



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Integración de Gemelo Digital y Simulación FEM para la Gestión de Activos y Mantenimiento Basado en Datos

Camilo Niño R., Diego Molina V., Juan Nieto
Calle 152b # 73b - 51

E.mail: camilo.nino@txfingenieria.co – fem@txfingenieria.co
Bogotá, D.C. – Colombia

Resumen

Este trabajo presenta una metodología que integra escaneo láser 3D, análisis geométrico, creación de un gemelo digital y simulación estructural FEM no lineal para la gestión de activos basada en datos.

La metodología se aplicó al tanque TK-000, el cual presentó deformaciones fuera de los límites del API 650 durante su primer llenado. El escaneo 3D permitió reconstruir la geometría real e identificar desviaciones críticas de verticalidad y redondez. Con esta información, se desarrolló un modelo para evaluar la respuesta estructural a cargas hidrostáticas y sísmicas, localizando zonas críticas de esfuerzo y desplazamiento.

Los resultados respaldaron reparaciones localizadas, logrando una reducción en las desviaciones geométricas y una mejora en la distribución de esfuerzos, con una disminución de los valores máximos de 238 MPa a 236 MPa. El gemelo digital consolidó la información geométrica y estructural, habilitando estrategias de monitoreo y mantenimiento predictivo, demostrando el valor del escaneo 3D y FEM para optimizar el ciclo de vida de los activos industriales.

1. Introducción

En la industria del petróleo y gas, la integridad estructural de los tanques de almacenamiento es un pilar de las estrategias de mantenimiento y gestión de activos, al impactar la seguridad, la disponibilidad operativa y la vida útil de las instalaciones. Las deformaciones geométricas

fuera de los límites de API 650 pueden incrementar la necesidad de intervención y acelerar el deterioro estructural, por lo que requieren evaluaciones técnicas confiables.

El tanque TK-000, construido en 2022, presentó desviaciones geométricas desde su puesta en servicio y una deformación relevante durante su primer llenado. El seguimiento mediante escaneo láser 3D evidenció variaciones dependientes del nivel de llenado, conduciendo a su no aceptación y posterior reparación. Durante la intervención se aplicaron controles geométricos sucesivos, y tras la reparación se validó el desempeño estructural mediante un ciclo completo de llenado y vaciado.

La integración de escaneo 3D, simulaciones FEM no lineales y gemelo digital permitió identificar zonas críticas, soportar decisiones de mantenimiento correctivo y establecer una base para estrategias de mantenimiento predictivo y extensión de la vida útil del activo.

Objetivos del caso de estudio

- Evaluar la condición estructural real del tanque TK-000.
- Identificar áreas críticas conforme a API 650 mediante análisis FEM.
- Apoyar decisiones de mantenimiento y reparación proactivas.

2. Estado del Arte

El gemelo digital es una representación virtual de un activo físico que integra datos geométricos,



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



históricos y modelos numéricos, permitiendo evaluar su condición, analizar escenarios operativos y soportar estrategias de mantenimiento basadas en datos (Grieves, 2014; Tao et al., 2018). En tanques de almacenamiento, el uso de escaneo láser 3D como entrada del gemelo digital incrementa significativamente la cantidad y calidad de información disponible, facilita el registro histórico de deformaciones y mejora la trazabilidad del comportamiento estructural a lo largo del tiempo.

El Método de Elementos Finitos (FEM) es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar esfuerzos, deformaciones y mecanismos de falla en estructuras sometidas a cargas complejas (Zienkiewicz & Taylor, 2000; Bathe, 2014). La incorporación de geometría real en modelos FEM permite identificar concentraciones de esfuerzo asociadas a imperfecciones constructivas o deformaciones operativas, proporcionando un soporte técnico robusto para decisiones de reparación y mantenimiento.

El estándar API 650 establece los criterios de diseño, tolerancias geométricas e integridad estructural para tanques de almacenamiento atmosféricos, constituyendo la base normativa para la evaluación de su condición (API, 2013). La integración de gemelo digital, escaneo 3D y simulaciones FEM complementa estos requisitos normativos con un enfoque de mantenimiento basado en condición, alineado con prácticas modernas de gestión de activos y confiabilidad (Lee et al., 2015; Kim et al., 2021).

3. Metodología

La metodología integra escaneo láser 3D, análisis geométrico y simulaciones estructurales no lineales por el Método de Elementos Finitos (FEM) para evaluar la integridad estructural del

tanque TK-000 y soportar decisiones de mantenimiento y reparación basadas en datos.

2.1 Caso de estudio: Tanque TK-000

El tanque TK-000, construido en 2022 y ubicado en la estación Sebastopol, está destinado al almacenamiento de diésel. Cuenta con una capacidad nominal de 101,625 barriles (BBLs), techo fijo, altura de 47.9 ft y diámetro de 123 ft. Desde la etapa constructiva se identificaron desviaciones en verticalidad y redondez, las cuales no fueron corregidas inicialmente.

Durante inspecciones en operación, particularmente a niveles de llenado superiores al 50 %, se observaron deformaciones significativas concentradas en dos zonas del cuerpo (Figura 1). Estas condiciones, junto con señales acústicas durante el llenado, motivaron la ejecución de una evaluación estructural avanzada para determinar la necesidad de intervención conforme a API 650.

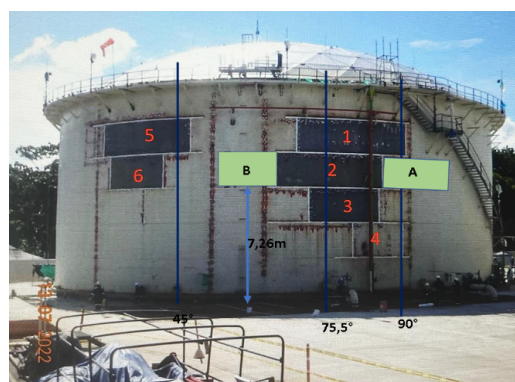


Fig. 1 – Tanque Real y Secciones con Deformaciones (A y B)

2.2 Escaneo láser 3D y procesamiento geométrico

La recolección de datos geométricos se realizó en dos fases: antes de la reparación (2022) y después de la intervención (noviembre de 2024). En ambas campañas se ejecutó un escaneo láser 3D del perímetro completo del tanque, con énfasis en las



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Asociación Colombiana
de Ingenieros

zonas críticas previamente identificadas (ver Fig. 2).

Las nubes de puntos obtenidas fueron procesadas mediante software especializado para su alineación, filtrado y conversión en superficies CAD, permitiendo reconstruir la geometría real del tanque y realizar comparaciones entre estados operativos. Esta información constituyó la base para los análisis geométricos y las simulaciones estructurales.



Fig. 2 – Nube de puntos del tanque TK-000

2.3 Simulación por elementos finitos (FEM)

A partir de las superficies CAD se desarrolló un modelo FEM tridimensional empleando elementos tipo shell. Los espesores del cuerpo variaron entre 9.525 mm (ASTM A36) y 15.875 mm (ASTM A516 Gr 70). El modelo incluyó aproximadamente 76,000 elementos, con verificación de convergencia basada en un criterio variación de deformaciones de 0.5 %. La convergencia se observa en la Fig. 3

El análisis se realizó considerando no linealidades geométricas y del material. Se aplicaron cargas por presión hidrostática para distintos niveles de llenado ($\rho = 850 \text{ kg/m}^3$), peso propio y cargas sísmicas según NSR-10. Las condiciones de frontera (Fig. 4) incluyeron soporte fijo en la base, restricciones en el borde superior por efecto del

techo fijo y la aplicación del peso del domo como carga distribuida.

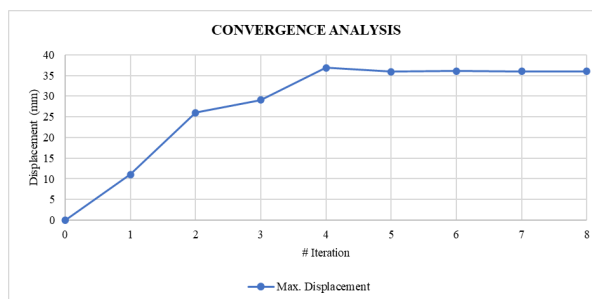


Fig. 3 – Análisis de convergencia del modelo FEM

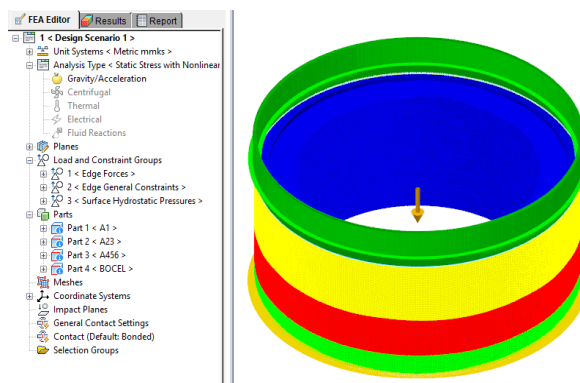


Fig. 4 – Cargas y condiciones de frontera

4. Resultados y Discusión

3.1 Condición Pre-Reparación

3.1.1 Análisis de Ejes Críticos

Se llevó a cabo un análisis geométrico detallado sobre los ejes críticos identificados previamente mediante inspecciones en campo y simulaciones FEM realizadas por TXF Ingeniería. El análisis incluyó ejes con altos esfuerzos equivalentes de Von Mises ($97,23^\circ$, 110° , 64° y $61,53^\circ$), así como un eje de referencia sin deformaciones significativas (180°).

La evaluación se desarrolló para tres niveles de llenado, evidenciando patrones de deformación



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Asociación Colombiana
de Ingenieros

consistentes en todos los casos, con variaciones en la magnitud de los desplazamientos máximos entre etapas. Este comportamiento confirma la existencia de deformaciones localizadas sensibles al nivel de carga, como se muestra en la Figura 5.



Fig. 5 –Análisis de Ejes Críticos

3.1.2 Comparación de la Zona A

En la Zona A se elaboró una representación bidimensional que relaciona la posición angular y vertical, utilizando una escala de colores para representar el desplazamiento radial. La comparación entre las geometrías correspondientes a 0 % y 100 % de llenado, para las tres fases evaluadas, permitió identificar cambios progresivos en la abolladura principal.

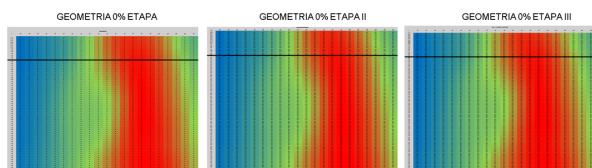


Fig. 6 –Contorno de deformación – Zona A

Se observó un incremento angular de 1° (de 92° – 101° a 92° – 102°) y una reducción en la altura de la abolladura de 2,057 m a 1,946 m, lo que evidencia la dependencia de la deformación respecto al nivel de llenado y a los ciclos operativos. Estas tendencias se resumen en la Figura 6.

3.1.3 Comparación de la Zona B

La Zona B fue analizada mediante la misma metodología. A 0 % de llenado, la geometría presentó un comportamiento uniforme; sin embargo, a 100 % de llenado se identificó la aparición de dos abolladuras diferenciadas. La abolladura principal mostró una reducción aproximada del 42 % en su altura al aumentar el nivel de llenado, así como un desplazamiento angular de 2° hacia la derecha. Las deformaciones se concentraron entre los 55° y 70° , con variaciones de altura entre 10,0 m y 12,1 m. Los resultados se ilustran en la Figura 7.

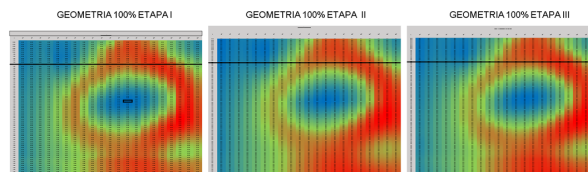


Fig. 7 –Contorno de deformación – Zona B

3.1.4 Resultados de la Simulación FEM

Se realizaron simulaciones FEM no lineales considerando tres fases de llenado e incorporando cargas sísmicas. Los resultados evidenciaron un incremento progresivo de los esfuerzos equivalentes y desplazamientos entre etapas.

El escenario más crítico correspondió a la Fase III en condición de 0 % de llenado, donde se obtuvo un esfuerzo equivalente de Von Mises máximo de 238 MPa, localizado en la posición angular de 101° y a una altura de 9,733 m, con desplazamientos máximos del orden de 62 mm. En comparación, la Fase I presentó esfuerzos máximos de 207 MPa. El resumen de estos resultados se presenta en la Figura 8 – Resultados de Simulación Pre-Reparación.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia

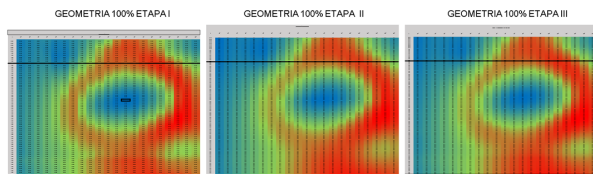


Fig. 8 – Resultados de Simulación (Condición Pre-Reparación)

3.1.5 Integración de Resultados para la Gestión de Activos y Decisión de Mantenimiento

Los resultados obtenidos en la condición pre-reparación demostraron que las deformaciones geométricas y las concentraciones de esfuerzo del Tanque TK-000 están directamente asociadas a los ciclos de llenado y a la acumulación de cargas operativas. Las variaciones observadas entre fases confirmaron un comportamiento estructural no estable, con incremento progresivo de esfuerzos y desplazamientos, lo que representaba un riesgo creciente para la integridad y confiabilidad del activo.

Desde la perspectiva de gestión de activos, la integración del escaneo láser 3D con simulaciones FEM permitió cuantificar el impacto real de las desviaciones geométricas sobre la respuesta estructural, superando un enfoque de mantenimiento basado únicamente en inspecciones visuales o criterios normativos aislados. Esta información permitió priorizar zonas críticas, definir el nivel de intervención requerido y justificar técnicamente la necesidad de reparación.

La decisión de ejecutar reparaciones no se fundamentó exclusivamente en el incumplimiento de API 650, sino en la necesidad de restablecer márgenes de seguridad operativos y asegurar la vida útil remanente del tanque. Asimismo, los resultados habilitaron la definición de un esquema de mantenimiento basado en condición, apoyado en el monitoreo geométrico periódico y la

actualización del modelo estructural como herramientas de control de integridad.

Este enfoque consolida el uso de herramientas digitales avanzadas como un componente clave de la gestión moderna de activos, permitiendo decisiones de mantenimiento más oportunas, con menor incertidumbre y alineadas con los objetivos de seguridad y continuidad operacional.

3.2 Condición Post-Reparación

3.2.1 Comparación Geométrica 3D

Posterior a la reparación, se realizó una comparación tridimensional entre las superficies capturadas durante las inspecciones del 5 de mayo y del 15 de agosto de 2024. El análisis se centró en identificar desviaciones geométricas residuales.

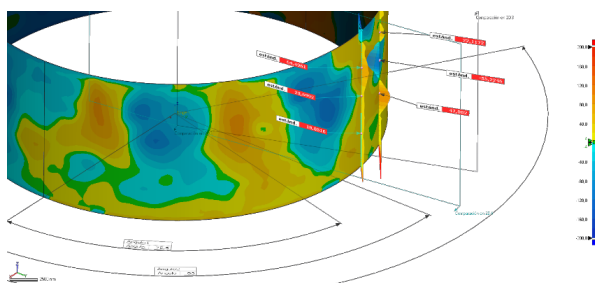


Fig. 9 – Comparación Geométrica de Superficies

La desviación máxima hacia el interior fue de $-96,31$ mm en la posición angular de 99° , mientras que en las zonas adyacentes se registraron desviaciones menores entre 0 y -20 mm. Varias áreas del tanque presentaron diferencias dentro del rango de ± 4 mm, indicando una mejora general de la geometría. Estos resultados se muestran en la Figura 9.

3.2.2 Análisis de Verticalidad

El análisis de verticalidad evaluó las desviaciones horizontales a lo largo de la altura del tanque respecto a una línea vertical ideal. En diferentes



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



niveles de llenado se identificaron desviaciones hacia el interior y exterior en varios ejes críticos.

Un análisis normalizado con el criterio H/200 evidenció que, aunque persisten desviaciones graduales, estas son de menor severidad en comparación con la condición pre-reparación. Este comportamiento resalta la necesidad de un seguimiento continuo para asegurar la integridad estructural y la precisión volumétrica. Los resultados representativos se presentan en la Figura 10.

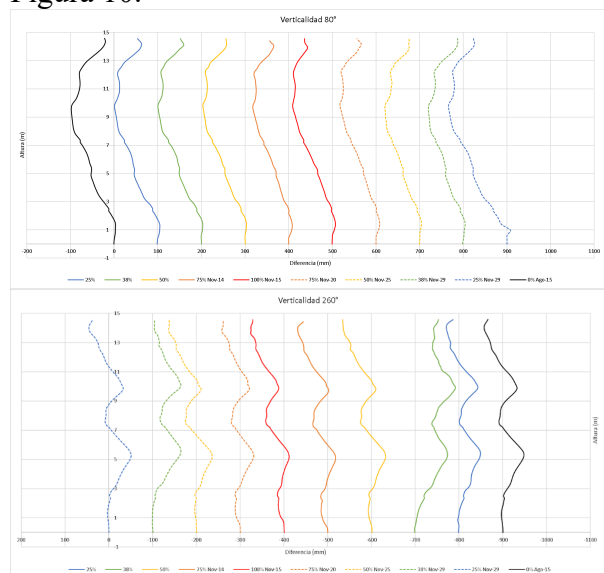


Fig. 10 – Análisis de Verticalidad (Ejes 80° y 260°)

3.2.3 Análisis de Redondez

El análisis de redondez comparó diámetros medidos en ejes opuestos en el primer nivel de altura del tanque. Para un diámetro nominal de 37.490 mm y una tolerancia de ± 38 mm, los valores medidos oscilaron entre 37.452 mm y 37.528 mm, con solo una medición fuera del rango permitido.

En términos generales, el tanque presenta desviaciones aceptables respecto a la geometría cilíndrica ideal, como se resume en la Figura 11.

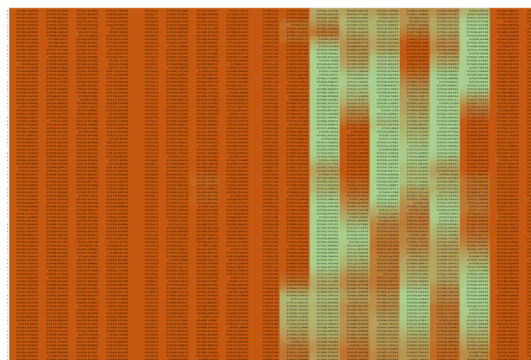


Fig. 11 – Análisis de Redondez

3.2.4 Resultados de la Simulación FEM Post-Reparación

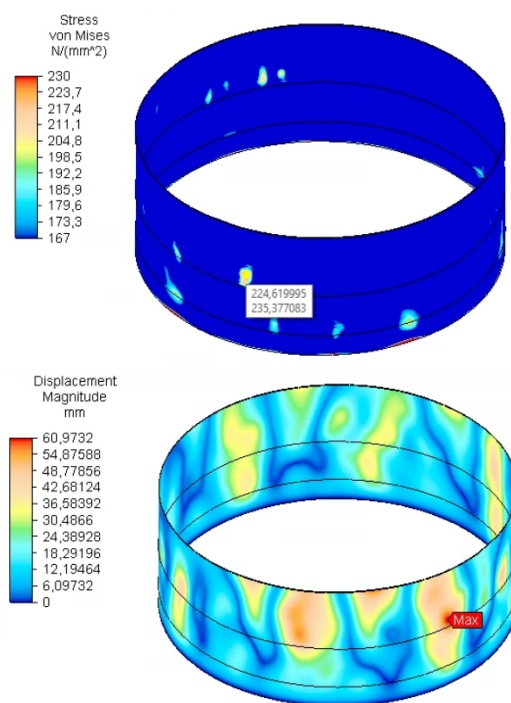


Fig. 12 – Resultados de Simulación Post-Reparación (Condiciones Normales)

3.3 Discusión Final sobre Mantenimiento y Gestión de Activos

Los resultados post-reparación evidencian una mejora significativa en la estabilidad estructural y en la previsibilidad del comportamiento del



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Tanque TK-000, condiciones esenciales para una gestión de activos eficaz. La reducción de desviaciones geométricas críticas, junto con mejoras en verticalidad y redondez, confirma que el tanque retorna a un estado controlado, compatible con una operación segura y con planes de mantenimiento estructurados.

Desde el enfoque de mantenimiento, esta estabilización geométrica permite evolucionar desde esquemas reactivos hacia un mantenimiento basado en condición. Las simulaciones FEM muestran concentraciones de esfuerzo localizadas y dentro de rangos aceptables, reduciendo el riesgo de daño acumulativo durante ciclos de operación y permitiendo definir intervalos de inspección más racionales y focalizados.

La integración de escaneo láser 3D, análisis geométrico y simulación estructural se consolida como una herramienta clave para la gestión del ciclo de vida del activo. El gemelo digital habilita la captura de grandes volúmenes de datos en menor tiempo, la comparación histórica de estados estructurales y la identificación de tendencias de deformación, apoyando la priorización de intervenciones y la optimización de recursos de mantenimiento.

Finalmente, este enfoque facilita la incorporación del tanque en esquemas modernos de gestión de integridad y confiabilidad, como RBI y gestión del riesgo, fortaleciendo la toma de decisiones de mantenimiento desde una base cuantitativa y verificable. En conjunto, el estudio demuestra que la digitalización aplicada al mantenimiento incrementa la confiabilidad operativa, reduce riesgos y maximiza el valor del activo a lo largo de su vida útil.

5. Conclusiones

El análisis del Tanque TK-000 evidenció que desviaciones geométricas no controladas pueden evolucionar bajo ciclos operativos, generando concentraciones progresivas de esfuerzo que, en condición previa a la reparación, alcanzaron valores cercanos a 238 MPa, resaltando la necesidad de estrategias de mantenimiento proactivo y basado en condición.

La integración de escaneo láser 3D y simulaciones FEM no lineales permitió identificar de forma rápida y precisa zonas críticas localizadas, hacia el eje de 99°, transformando grandes volúmenes de datos geométricos en información accionable para mantenimiento, con mayor cobertura y menor tiempo de levantamiento que los métodos tradicionales.

Las reparaciones guiadas por este enfoque resultaron en una mejora significativa del desempeño estructural. Las comparaciones 3D post-reparación muestran una reducción sustancial de las desviaciones críticas, así como mejoras en verticalidad y redondez, aproximando la geometría del tanque al cilindro ideal y reduciendo el riesgo estructural durante la operación.

Las simulaciones FEM posteriores a la reparación, bajo condición de 0 % de llenado e incluyendo peso propio, techo fijo y cargas sísmicas conforme a NSR-10, arrojaron un esfuerzo equivalente máximo de 236 MPa a 110.9° y 8.755 m, con desplazamientos elásticos máximos de 60.97 mm. Estos valores fueron localizados y la mayor parte del tanque presentó factores de seguridad superiores a 2.

La implementación del gemelo digital consolidó información geométrica, estructural y operativa en un entorno único, permitiendo capturar mayor cantidad de datos en menor tiempo, comparar estados pre y post-reparación y construir un



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



registro histórico del comportamiento estructural, base para optimizar planes de inspección, habilitar mantenimiento predictivo y extender la vida útil del activo aportando a la toma de decisiones.

6. Bibliografía y Referencias

[1] American Petroleum Institute, API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage. Washington, DC: API, 2013.

[2] American Petroleum Institute, API Standard 653: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Washington, DC: API, 2014.

[3] M. Grieves, "Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication," en Digital Product Lifecycle Management: Complexity, Sustainability and Diversity. Cham: Springer, 2014, pp. 79–103.

[4] F. Tao, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang y F. Sui, "Digital twin and Industry 4.0: What they are, and how to apply them," Applied Sciences, vol. 8, no. 10, p. 1819, 2018.

[5] A. Fuller, Z. Fan, J. Rocks y D. Wilcox, "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research," Annual Reviews in Control, vol. 49, pp. 134–155, 2020.

[6] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, The Finite Element Method: Solid Mechanics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

[7] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha y R. J. Witt, Concepts and Applications of Finite Element Analysis. New York: John Wiley & Sons, 2002.

[8] K. J. Bathe, Finite Element Procedures. Watertown, MA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.

[9] J. Kim, J. Lee y J. Park, "Development of a digital twin framework for structural health monitoring of storage tanks," Structural Health Monitoring, vol. 20, no. 5, pp. 2041–2058, 2021.

[10] L. Wang, H. Zhang y X. Li, "Seismic vulnerability assessment of storage tanks using digital twin and finite element method," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 73, p. 104596, 2022.

[11] J. Müller, D. Kiel y K. I. Voigt, "Digital twins for the oil and gas industry: A survey of current trends and future

perspectives," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 195, p. 107515, 2020.

[12] E. Glaessgen y D. Stargel, "The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles," en 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012.

Autores: Diego Alejandro Molina Vásquez

Celular: +57 311 2658041

Dirección: Cll 22c #29A 47 T2 AP209 Bogotá

Oficina: TXF Ingeniería S.A.S.

E-mail: fem@txfingenieria.co

Ciudad: Bogotá

País: Colombia

Ingeniero Mecánico de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Cuenta con más de seis años de experiencia en proyectos industriales orientados a mantenimiento e integridad de activos, con énfasis en simulaciones por elementos finitos (FEM), escaneo láser 3D y desarrollo de gemelos digitales. Ha participado en múltiples proyectos de tanques, piping y estructuras, apoyando inspecciones API (653, 570, 510 y 581) y análisis estructurales aplicados a la toma de decisiones de mantenimiento. Su trabajo se enfoca en la integración de herramientas digitales para optimizar estrategias de mantenimiento basado en condición y gestión del ciclo de vida de activos industriales.

Camilo Niño Ruiz

Celular: +57 316 225 9567

Dirección: Calle 152b # 73b - 51

Oficina: TXF Ingeniería S.A.S.

E-mail: camilo.nino@txfingenieria.co

Ciudad: Bogotá

País: Colombia

Camilo Niño Ruiz es Ingeniero Mecánico de la Universidad EAFIT, con especialización en Negociación de la Universidad de los Andes. Se desempeña como Gerente Comercial en TXF Ingeniería S.A.S. y está certificado como inspector API 653 desde 2008. Cuenta con más de 20 años de experiencia en inspección, reparación y mantenimiento de tanques de almacenamiento, evaluaciones de aptitud para el servicio (API 579) y gestión de integridad de activos en la industria de hidrocarburos, con proyectos desarrollados en Colombia y otros países de la región.