



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE INSPECCIÓN TOPOGRÁFICA A TANQUES DE
ALMACENAMIENTO BASADO EN LA NORMA API 653.

HÉCTOR FABIÁN DÍAZ GARCÍA
CÓDIGO: D7301214

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA-FAEDIS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D.C. COLOMBIA
JULIO DE 2015



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE INSPECCIÓN TOPOGRÁFICA A TANQUES DE
ALMACENAMIENTO BASADO EN LA NORMA API 653.

HÉCTOR FABIÁN DÍAZ GARCÍA
CÓDIGO: D7301214

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero Civil

Asesor
Ing. SAIETH CHAVES PABÓN

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA-FAEDIS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, D.C. COLOMBIA
JULIO DE 2015

Nota de aceptación

Firma Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, D.C., 29 de julio de 2015

DEDICATORIA

Primeramente a Dios quien ha sido la base de mi vida.

A mi padre y madre, quienes con sus sabias palabras me han motivado a salir adelante y a nunca desmayar en el camino de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a:

La universidad Militar Nueva Granada por abrirme las puertas y formarme integralmente como ingeniero civil.

El Ingeniero Saieth Chaves Pabón, director del proyecto por su gran colaboración y entrega en la realización de este trabajo.

La ingeniera Carol Arevalo, quien con su gran conocimiento apporto a la elaboración de este documento.

La empresa INSERCOR S.A.S., quien ha contribuido a la realización de este proyecto.

El ingeniero certificado API 650 y 653, Luis Eduardo Álvarez quien aportó en la elaboración de la documentación técnica.

La empresa ECOPETROL S.A., por facilitar documentación técnica para el proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	18
2.	Objetivos.....	20
	2.1. Objetivo general	20
	2.2. Objetivos específicos.....	20
3.	Justificación.....	21
4.	Antecedentes.....	23
5.	Marco teórico.....	25
	5.1. American Petroleum Institute.....	25
	5.1.1. Norma API 650: Welded Tanks for Oil Storage.	25
	5.1.2. Norma API 653: Tank Inspection, repair, alteration, and reconstruction (Inspección, reparación, Alteración y reconstrucción de tanques).	26
	5.2. Tanques de almacenamiento	26
	5.2.1. De techo fijo.....	27
	5.2.2. De techo flotante.	28
	5.2.3. Sin techo.	30
	5.3. Asentamiento de cascos de tanques.....	30
	5.3.1. Tipos de asentamientos.	31
6.	Optimización del proceso de inspección topográfica a tanques de almacenamiento basado en la norma API 653.....	32
	6.1. Inspecciones topográficas de verticalidad y redondez a un tanque de almacenamiento.....	34

6.1.1. Procedimiento para la evaluación de Redondez y verticalidad.....	34
6.1.2. Equipos y materiales.	35
6.1.3. Determinación del número de ejes de medición.	35
6.1.4. Determinación de las alturas de medición por anillo.	36
6.1.5. Toma de datos.	37
6.1.6. Análisis y cálculo de la información.	38
6.1.6.1. Perdida de verticalidad.....	40
6.1.7. Evaluación de verticalidad y redondez en cuerpo de tanques de almacenamiento.	41
6.1.7.1. Verticalidad y redondez en cuerpos de tanques nuevos.	41
6.1.7.2. Verticalidad y redondez en cuerpos de tanques reconstruidos y/o reubicados.	42
6.1.7.3. Verticalidad y redondez en cuerpos de tanques en servicio.	44
6.1.7.4. Notas adicionales.....	47
6.1.7.5. Tablas comparativas de tolerancias para evaluación de verticalidad y redondez en cuerpos de tanques.....	48
6.1.8. Representación gráfica de verticalidad y redondez.	49
6.1.9. Entrega final.....	50
6.2. Inspección topográfica de asentamiento a un tanque de almacenamiento.....	51
6.2.1. Procedimiento para la evaluación de asentamiento.	51
6.2.2. Equipos y materiales.	52
6.2.3. Definición de los puntos sobre la periferia del casco.....	52
6.2.4. Ubicación del punto de lectura del asentamiento sobre el casco.	53
6.2.5. Toma de niveles de los puntos definidos sobre el casco.	56
6.2.6. Ajustes de los datos leídos a curva tipo coseno.....	57
6.2.7. Análisis de deflexión fuera del plano basados en la curva ajustada tipo coseno.	58

6.2.8. Método alternativo para verificar deflexión fuera del plano permisible en curvas ajustadas tipo coseno.....	61
6.2.9. Método alternativo para verificar deflexión fuera del plano permisible cuando no es posible obtener curva ajustada tipo coseno.....	63
6.2.10. Entrega final.....	64
6.3. Formatos adicionales.....	65
6.3.1. Entrega final para evaluaciones topográficas completas a tanques de almacenamiento usando asentamiento por curva óptima.	65
6.3.2. Entrega final para evaluaciones topográficas completas a tanques de almacenamiento usando asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.	66
7. Conclusiones.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de ejes de medida.	35
Tabla 2. Alturas de medición por anillo en cuerpos de tanques.	36
Tabla 3. Tolerancias para medición de redondez en tanques nuevos.	42
Tabla 4. Tolerancias para medición de redondez en tanques reconstruidos y/o reubicados.	43
Tabla 5. Tolerancias para medición de redondez de tanques en servicio de acuerdo al espesor de la lámina en el cuerpo del tanque.	45
Tabla 6. Comparación de tolerancias para verticalidad en cuerpos de tanques.	48
Tabla 7. Comparación de tolerancias para redondez en cuerpos de tanques.	49
Tabla 8. Puntos mínimos recomendados para toma de datos sobre la periferia del tanque.	53
Tabla 9. Valores módulo Young y esfuerzo fluencia para materiales de tanques.	60
Tabla 10. Longitudes de arco y asentamientos fuera del plano.	62
Tabla 11. Constante K para tanques según diámetros y tipos de techos.	63

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Tanque de techo fijo.	28
Foto 2. Tanque de techo flotante.	29
Foto 3. Colapso de estructura del tanque.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tanque de techo cónico fijo.....	27
Figura 2. Tanque de techo flotante.....	29
Figura 3. Tipos de asentamientos para cascos de tanques.	31
Figura 4. Alturas de medición, conforme a la tabla 2.	36
Figura 5. Medición de distancias horizontales.....	38
Figura 6. Láminas alineadas por el eje central.....	39
Figura 7. Láminas alineadas por lado interno.	39
Figura 8. Tolerancia de pérdida de verticalidad en el cuerpo del tanque.....	40
Figura 9. Tolerancia de pérdida de verticalidad y redondez en el cuerpo del tanque.	50
Figura 10. Esquema de medición con platina testigo soldada.	54
Figura 11. Esquema de medición con herramienta.	55
Figura 12. Esquema de mediciones no aceptadas.	55
Figura 13. Toma de niveles según puntos definidos.	56
Figura 14. Verificación de deflexión fuera del plano sobre curva tipo coseno.....	61
Figura 15. Representación gráfica de asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.....	64

ANEXOS

ANEXO A

VERTICALIDAD Y REDONDEZ

- Anexo A.1. Guía técnica para evaluaciones de verticalidad y redondez en cuerpo de tanques de almacenamiento atmosféricos.
- Anexo A.2. Especificaciones técnicas de equipos topográficos.
- Anexo A.3. Data Sheet.
- Anexo A.4. Toma de datos de verticalidad y redondez.
- Anexo A.5. Cálculo de redondez y verticalidad para láminas que están alineadas por el eje central.
- Anexo A.6. Cálculo de redondez y verticalidad para láminas que están alineadas por el lado interno.
- Anexo A.7. Evaluación de verticalidad y redondez.
- Anexo A.8. Representación gráfica de redondez.
- Anexo A.9. Representación gráfica de verticalidad.
- Anexo A.10. Informe final de evaluación de verticalidad y redondez del tanque.

ANEXO B

ASENTAMIENTO

- Anexo B.1. Guía técnica para estudio de asentamientos a cascos de tanques de almacenamiento.

- Anexo B.2. Especificaciones técnicas de equipos topográficos.
- Anexo B.3. Data Sheet.
- Anexo B.4. Toma de niveles para tanques.
- Anexo B.5. Cálculo de asentamiento por curva óptima.
- Anexo B.6. Cálculo de asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.
- Anexo B.7. Evaluación de asentamiento por curva óptima.
- Anexo B.8. Evaluación de asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.
- Anexo B.9. Informe final de evaluación de asentamiento por curva óptima.
- Anexo B.10. Informe final de evaluación de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.

ANEXO C

FORMATOS ADICIONALES

- Anexo C.1. Informe final de evaluación topográfica completa a tanque de almacenamiento usando asentamiento por curva óptima.
- Anexo C.2. Informe final de evaluación topográfica completa a tanque de almacenamiento usando asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.

IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CALIDAD.

- Evaluación de verticalidad, redondez y asentamiento a un tanque ejemplo.

GLOSARIO

API: American Petroleum Institute.

Tanque de almacenamiento en servicio: Tanque construido conforme a los lineamientos de los códigos API 650/ API 12C / API 12A y que ha sido puesto en servicio.

Tanque de almacenamiento nuevo: Tanque construido conforme a los lineamientos del código API 650 y que no sido puesto en servicio.

Tanque de almacenamiento reconstruido: Tanque construido conforme a los lineamientos de los códigos API 650/ API 12C / API 12A que ha sido puesto en servicio y que por requerimientos de la operación o negocio, se desmantela y se reconstruye en el mismo lugar o un área diferente para poner nuevamente en servicio.

Tanque de almacenamiento reubicado: Tanque construido conforme a los lineamientos de los códigos API 650/ API 12C / API 12^a que ha sido puesto en servicio y que por requerimientos de la operación o negocio se reubica en un área diferente sin ser desmantelado para poner nuevamente en servicio.

Pérdida de redondez en cuerpos de tanques: Diferencia existente entre los radios de un modelo de tanque con redondez óptima y la forma real del tanque.

Pérdida de verticalidad en cuerpo de tanques: Diferencia en cuanto a la desviación que existe entre un punto situado en la base del tanque y uno ortogonal ubicado en la parte superior del tanque.

Punto de referencia: Punto ubicado a una distancia del perímetro externo del tanque a partir del cual se tomaran las mediciones.

Asentamiento fuera de plano: Es la medida de la diferencia entre los niveles definidos por la curva ajustada tipo coseno y los puntos leídos.

Asentamiento no planar: Debido a que el casco del tanque es una estructura flexible, este puede asentarse en una configuración no planar, induciendo esfuerzos adicionales al casco. Por otra parte, los asentamientos fuera del plano, pueden inducir pérdida de redondez del casco del tanque que en el momento de ser excesivos, pueden generar problemas en el funcionamiento de los techos flotantes y en las membranas internas flotantes.

Asentamiento uniforme: Este asentamiento a que todo el casco baja el mismo nivel en toda la periferia. Es un asentamiento que puede ser calculado con base en el estudio de suelos de forma precisa. Este tipo de asentamiento puede afectar las boquillas, tuberías y accesorios, sino se toman acciones preventivas.

Coefficiente de correlación: Es una fracción que representa que tan cerca es la curva ajustada a los datos inicialmente leídos.

Curva ajustada tipo coseno: Es la serie de puntos, que al aplicar un procedimiento de regresión lineal, simula los niveles de los puntos de la periferia del tanque como una curva cosenoidal. Para que esta curva se considere que representa adecuadamente los niveles de los puntos leídos, el coeficiente de correlación debe ser mayor o igual a 0.9.

Inclinación de cuerpo rígido de un tanque (inclinación planar): Este asentamiento se da por la rotación del tanque en un plano inclinado. Este asentamiento genera un incremento del nivel del producto en un sector del tanque. Una inclinación excesiva puede generar una pérdida de tolerancia en el espacio anular de los sellos de los techos flotantes y/o membranas internas flotantes restringiendo el libre desplazamiento de estos elementos. Al igual que el asentamiento uniforme, puede afectar las boquillas, tuberías y accesorios

RESUMEN

El siguiente documento contiene un proceso (opcional) que puede utilizar cualquier empresa contratista del sector de la industria petroquímica que realice trabajos como contratista en proyectos de inspección e integridad a tanques de almacenamiento a Ecopetrol S.A.

Este proyecto busca crear un sistema de gestión de calidad que asegure los procesos de inspección topográfica realizadas a tanques de almacenamiento basado en la norma API 653.

Para la realización de este trabajo se hizo una rigurosa investigación sobre reparación y mantenimiento a tanques de almacenamiento mediante el estudio de la norma API 653 “Inspección, reparación, Alteración y reconstrucción de tanques” (Verticalidad – API 653: Section 10 – 10.5.2. Plumbness , Redondez – API 653: Section 10 – 10.5.3. Roundness, Asentamiento – API 653: Annex B – Evaluation of tank bottom settlement), y también con la ayuda de:

- LUIS EDUARDO ALVAREZ, ingeniero certificado API 653.
- SAIETH BAUDILIO CHAVES, Ingeniero civil.

Al finalizar el siguiente sistema de gestión de calidad, se quiere lograr una reducción de tiempo en la ejecución de estos trabajos (optimización) en comparación (porcentaje) con los anteriores procedimientos que en estos momentos se llevan a cabo para dichos trabajos. Esto se lograra mediante un ejemplo real a un tanque de almacenamiento, mediante la elaboración de: Procedimientos, Formatos de toma de datos de campo, Formatos de

cálculos, Macros para cálculos en los diferentes tipos de asentamientos, Formatos de resultados, Representaciones gráficas, Modelos de informe final.

También se busca que este trabajo sea revisado y aprobado por Ecopetrol S.A., y diferentes empresas contratistas que quieran implementar el sistema de gestión de calidad en sus organizaciones.

1. Introducción

Los sistemas de gestión de calidad son herramientas que permiten a cualquier organización planear, ejecutar y controlar cualquier actividad necesaria para el desarrollo de una misión, prestando servicios con los máximos estándares de calidad que son medidos a través de los indicadores de satisfacción del cliente.

El presente documento incluye un sistema de gestión de calidad para los trabajos de inspección topográfica externa a tanques de almacenamiento en plantas petroquímicas basado en la norma API 653, con el fin de asegurar el control y la integridad de estas estructuras que son de mucha importancia para las empresas que manejan productos derivados del petróleo y generar confianza en los resultados entregados al cliente, ya que de ellos dependen sus reparaciones o normal funcionamiento.

El desarrollo de este trabajo está basado en la norma API 653 y también en documentación técnica que posee la empresa ECOPETROL S.A. y de compañías contratistas que les prestan sus servicios de control de integridad a equipos en sus diferentes plantas a nivel nacional.

El siguiente trabajo tiene documentación base que le servirá a cualquier empresa especialista en trabajos de inspección e integridad de equipos su optimización y confiabilidad en las inspecciones topográficas.

Documentación como:

- Procedimientos.
- Formatos de toma de datos de campo.
- Data sheets.

- Formatos de cálculos
- Macros para cálculos en los diferentes tipos de asentamientos.
- Formatos de resultados.
- Representaciones gráficas
- Modelos de informe final.

Nota: La documentación mencionada anteriormente, está basada en los modelos de informe y reportes que exige Ecopetrol S.A. a las empresas contratista que realizan estos trabajos para la entrega final de resultados, ya que hace parte de su sistema de gestión de calidad, es por eso, que esta documentación no está basada en norma APA.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Crear un sistema de gestión de calidad que asegure las inspecciones topográficas realizadas a tanques de almacenamiento basado en la norma API 653.

2.2. Objetivos específicos

- Conocer los tipos y clases de tanques de almacenamiento para productos derivados del petróleo.
- Identificar la normativa referente a los tanques de almacenamiento.
- Generar los respectivos procesos que se necesitan para asegurar los trabajos topográficos externos a tanques de almacenamiento.
- Crear procedimientos para los trabajos de inspección topográfica de verticalidad, redondez y asentamiento.
- Elaborar los diferentes formatos para toma de datos en campo.
- Evaluar por medio de herramientas informáticas los respectivos datos tomados en campo para verticalidad, redondez y asentamiento.
- Construir formatos de entrega final para las diferentes inspecciones al tanque (verticalidad, redondez y asentamiento).
- Establecer los tipos de representaciones gráficas para las diferentes inspecciones.
- Implementar el sistema de gestión de calidad a un tanque de almacenamiento de Ecopetrol en la planta Ayacucho (Cesar).

3. Justificación

Colombia es un país situado en la región noroccidental de América del sur, con una superficie de 2' 129.748 km², posee una diversidad cultural, climática, flora, animal, minera entre otras que no posee muchos países, entre toda esa diversidad minera existe la exploración de petróleo.

ECOPETROL S.A., es la empresa de petróleos más importante en Colombia la cual es la encargada de explorar, refinar y transportar sus derivados, como lo son por ejemplo, la gasolina, ACPM, nafta, turbos, parafinas, entre otros.

Para el almacenamiento de todos estos productos se construyeron tanques, los cuales se encuentran distribuidos en plantas ubicadas alrededor del país.

Pero la mayor parte de estos tanques de almacenamiento tienen muchos años de servicio, algunos poseen más de 50 años, por lo cual es importante la respectiva inspección completa de estas estructuras, para que se pueden prevenir accidentes que podrían afectar a sectores sensibles de la empresa como lo son el personal, la economía, los clientes, la imagen de la empresa y en gran medida el medio ambiente, ya que muchos de estos tanques se encuentran cerca de cuerpos hídricos, como por ejemplo la refinería de Barrancabermeja que se encuentra en la orilla del río Magdalena.

Dentro de las inspecciones que se le realizan a los tanques de almacenamiento se encuentran las topográficas, en el cual se busca dar una evaluación exacta con respecto a su redondez, verticalidad y asentamiento, ya que por agentes como lo son, tiempo de servicio, corrosión, altura de llenado, producto, entre otros que podrían activar un deterioro progresivo de los tanques.

Para esta evaluación se usa la norma API 653, que trata de las inspecciones que se realizan a tanques construidos bajo la norma API 650, esta primera norma solo menciona los valores permisibles de aceptación para cada una de las respectivas evaluaciones (verticalidad, redondez y asentamiento), pero no posee los procedimientos, equipos, cálculos, formatos, etc. Que se presentan a la hora de dar un diagnóstico real del estado físico externo del tanque.

Este proyecto tiene como finalidad generar un sistema de control de las inspecciones topográficas a tanques de almacenamiento basado en la norma API 653, que asegure la calidad de los trabajos que realizan las empresas contratistas y son entregadas a Ecopetrol S.A.

4. Antecedentes

Ecopetrol S.A., antiguamente empresa Colombiana de petróleos S.A., es la empresa más grande del país y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su tamaño, Ecopetrol S.A. pertenece al grupo de las 39 petroleras más grandes del mundo y es una de las cinco principales de Latinoamérica. Son dueños absolutos o tienen la participación mayoritaria de la infraestructura de transporte y refinación del país.

Ecopetrol S.A. reconoce la existencia de riesgos de sus procesos y operaciones que pueden desviar a la compañía en el cumplimiento de sus objetivos estratégicos. Para esto, como parte de sistema de control interno de la organización, cuenta con una gestión integral de riesgos que fue implementada desde el 2003. Esta busca asegurar el cumplimiento de los objetivos de la organización, generar valor agregado, prevenir las amenazas, aprovechar las oportunidades y minimizar los impactos negativos derivados de la exposición de riesgos (ECOPETROL S.A., 2015).

Dentro de la gran infraestructura que posee Ecopetrol S.A. están los tanques de almacenamiento de productos derivados del petróleo, los cuales están contruidos bajo los más altos estándares conocidos a nivel mundial como lo son los establecidos por el API.

American Petroleum Company (API) es una asociación comercial estadounidense que representa todos los aspectos de la industria del petróleo y gas natural. Remota sus inicios desde la primera guerra mundial, cuando el congreso y la industria del petróleo trabajaron juntos para ayudar al esfuerzo de guerra. (American Petroleum Institute, 2014)

Esta asociación posee diferentes normas dentro de las cuales está la API 653 que cubre la inspección de tanques de aceros al carbono y aceros de baja aleación contruidos bajo el

estándar API 650 y su antecesor API 12.C. Este estándar provee los requerimientos mínimos para mantener la integridad de tanques soldados o remachados, no refrigerados, de presión atmosférica y de almacenamiento sobre tierra después que han sido puestos en servicio.

Actualmente Ecopetrol S.A., no cuenta con un sistema que asegure la calidad de las inspecciones topográficas a los tanques de almacenamientos que tiene en sus plantas y que son construidos bajo la norma API 650, puesto que el API 653 solo establece los rangos en los cuales se evaluarán los resultados, más no el proceso de inspección desde su inicio.

5. Marco teórico

5.1. American Petroleum Institute

American Petroleum Institute (API), es la única asociación comercial nacional que representa todos los aspectos de la industria del petróleo y gas natural en los Estados Unidos. Sus orígenes remontan a la primera guerra mundial, cuando el congreso y la industria del petróleo y gas natural doméstico trabajaron juntos para ayudar al esfuerzo de la guerra. (American Petroleum Institute, 2014)

El American Petroleum institute se encarga de reunir a todas las personas vinculadas con la industria del petróleo y gas natural (Consultores, contratistas, empresas, etc.), para crear y discutir actualizaciones o nuevas normas que se utilizaran en la fabricación de equipos (Tanques, válvulas, tuberías, etc.), que son usados en la industria petrolera.

Dos de sus normas más importantes son actualizadas cada 4 años, las cuales son:

5.1.1. Norma API 650: Welded Tanks for Oil Storage.

Esta norma establece los requisitos mínimos de materiales, diseño, fabricación, montaje y pruebas para la vertical, cilíndrico, sobre el suelo, cerrada y descapotable, tanques de almacenamiento soldados en varios tamaños y capacidades de las presiones internas que se aproximan a la presión atmosférica. Esta norma solo se aplica a las cisternas cuyo entero inferior se apoya de manera uniforme y con tanques en servicio no refrigerado que tiene una temperatura máxima de diseño de 90°C. (American Petroleum Company, 2012)

5.1.2. Norma API 653: Tank Inspection, repair, alteration, and reconstruction (Inspección, reparación, Alteración y reconstrucción de tanques).

Esta norma cubre tanques de acero para almacenamiento construidos bajo el Estándar API650 y su precursor API 12C. Proporciona requisitos mínimos para mantener la integridad de tales tanques después de que se hayan colocado en servicio y trata la inspección, reparación, alteración, relocalización, y reconstrucción.

El alcance está limitado a la fundación del tanque, fondo, cuerpo, estructura, techo, aditamentos agregados, boquillas agregadas a la cara de la primera brida, primera unión roscada o soldadas. Muchos de los diseños, soldadura, inspección y los requerimientos de los materiales de acuerdo con API 650 pueden ser aplicados en la inspección de mantenimiento, toma de datos, reparaciones, y alteraciones de tanques en servicio. En el caso de aparentes conflictos entre los requisitos de este estándar y API 650 o su predecesor API 12C, Este estándar deberá predominar para tanques que han sido puestos en servicio (American Petroleum Institute, 2012).

5.2. Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento se usan como depósitos para contener una reserva suficiente de algún producto para su uso posterior y/o comercialización. Los tanques de almacenamiento, se clasifican en:

- Cilíndricos horizontales.
- Cilíndricos verticales de fondo plano.

Los tanques cilíndricos horizontales, generalmente son de volúmenes relativamente bajos, debido a que presentan problemas por fallas de corte y flexión. Por lo general, se

usan para almacenar volúmenes pequeños. Los tanques cilíndricos verticales de fondo plano nos permiten almacenar grandes cantidades volumétricas con un costo bajo. Con la limitante que solo se pueden usar a presión atmosférica o presiones internas relativamente pequeñas. (Rodríguez, 1980)

Estos tipos de tanques se clasifican en:

5.2.1. De techo fijo.

Se emplean para contener productos no volátiles o de bajo contenido de ligeros (no inflamables) como son: agua, diésel, asfalto, petróleo, crudo, etc. Debido a que al disminuir la columna de fluido, se va generando una cámara de aire que facilita la evaporación del fluido, lo que es altamente peligroso. (Rodríguez, 1980)

Los techos fijos se clasifican en:

- Techos auto soportados.
- Techos soportados.

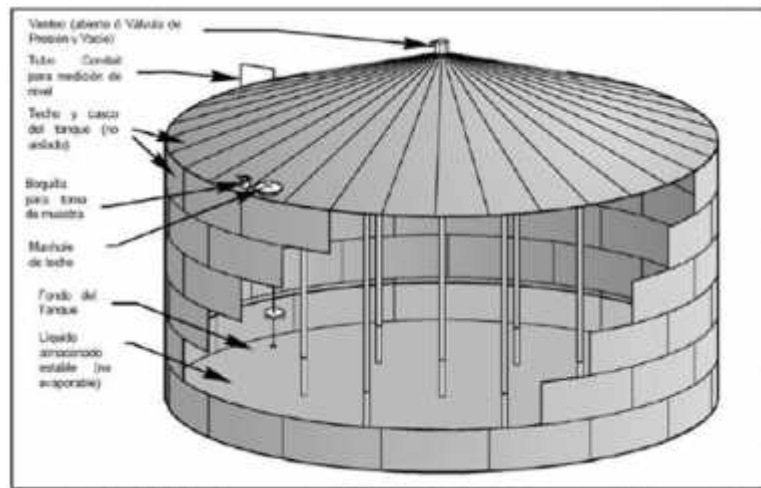


Figura 1. Tanque de techo cónico fijo.
Fuente: API MPMS Capítulo 19.1



Foto 1. Tanque de techo fijo.

Fuente: Internet.

5.2.2. De techo flotante.

Se emplean para almacenar productos con alto contenido de volátiles como son: alcohol, gasolinas y combustibles en general.

Este tipo de techo fue desarrollado para reducir o anular la cámara de aire, o espacio libre entre el espejo del líquido y el techo, además de proporcionar un medio aislante para la superficie del líquido, reducir la velocidad de transferencia de calor al producto almacenado durante los periodos en que la temperatura ambiental es alta, evitando así la formación de gases (su evaporación), y consecuentemente, la contaminación del ambiente y, al mismo tiempo se reducen los riesgos al almacenar productos inflamables. (Rodríguez, 1980)

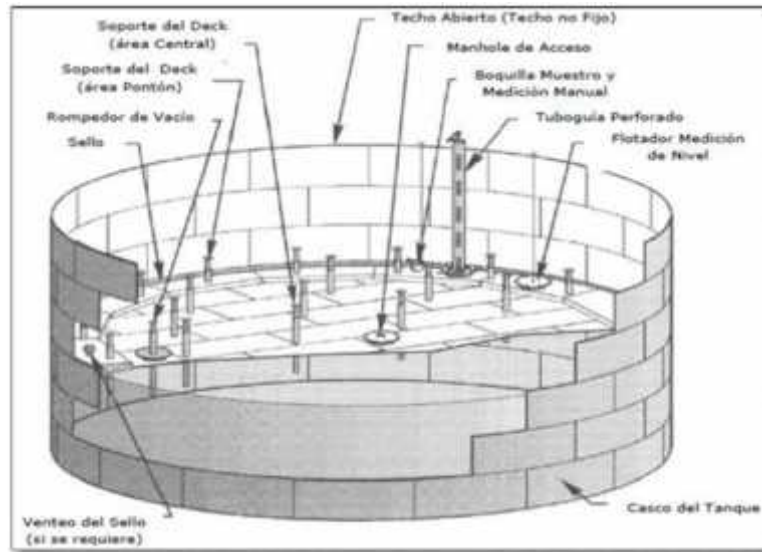


Figura 2. Tanque de techo flotante.
Fuente: API MPMS Capitulo 19.2



Foto 2. Tanque de techo flotante.
Fuente: Ecopetrol web

5.2.3. Sin techo.

Se usan para almacenar productos en los cuales no es importante que éste se contamine o que se evapore a la atmósfera como el caso del agua cruda, residual, contra incendios, etc. El diseño de este tipo de tanques requiere de un cálculo especial del anillo de coronamiento (Rodríguez, 1980).

5.3. Asentamiento de cascos de tanques

La gran mayoría de tanques que están cimentados directamente sobre el suelo o sobre vigas de cimentación, son susceptibles de experimentar asentamientos en el casco del tanque. Este asentamiento depende en gran medida del suelo sobre el cual está apoyado, los trabajos que se hayan realizado para mejorar el suelo al momento de construirlo y de la estructura de la cimentación utilizada.

Los asentamientos excesivos del casco de los tanques, puede afectar en lo siguiente:

- Dificultades para el drenaje del tanque.
- Deformaciones del casco.
- Altos esfuerzos en láminas del casco.
- Altos esfuerzos en la unión casco-fondo.
- Altos esfuerzos en las conexiones del tanque.

Por lo anterior, se deben realizar periódicamente evaluaciones de asentamientos de los cascos de los tanques, dependiendo del comportamiento durante su vida útil.

5.3.1. Tipos de asentamientos.

Los asentamientos de los cascos en tanques pueden ser uno o la combinación de los siguientes tipos de asentamientos:

- Asentamiento uniforme.
- Inclinación de cuerpo rígido de un tanque (inclinación planar).
- Asentamiento no planar.

Los estudios de asentamientos, tienen como objeto identificar cada uno de los componentes del asentamiento y evaluarlos contra las tolerancias que establecen las normas. Por otra parte, estos estudios son la base para definir la necesidad o no de realizar una re-nivelación total o parcial del tanque (Ecopetrol S.A., 2014)

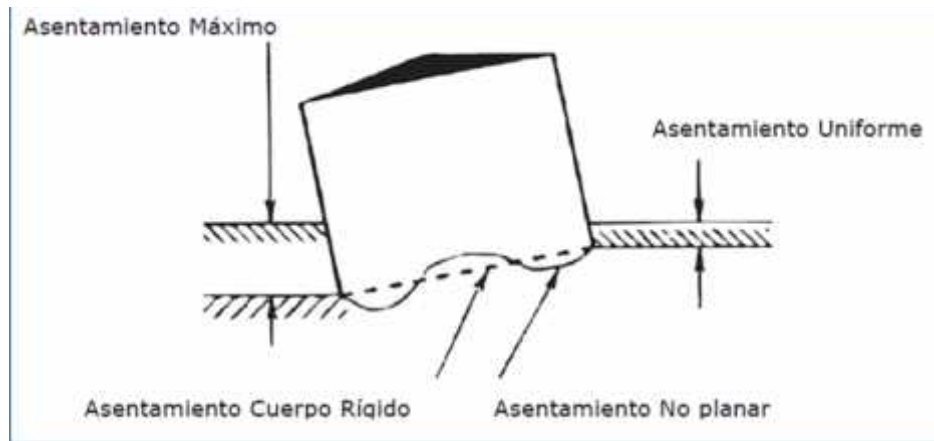


Figura 3. Tipos de asentamientos para cascos de tanques.

Fuente: API 653.

6. Optimización del proceso de inspección topográfica a tanques de almacenamiento basado en la norma API 653

La optimización busca realizar de una mejor manera (Tiempo, presupuesto, personal, etc.) el proceso de inspección topográfica a tanques de almacenamiento, asegurando la calidad y confiabilidad de estos trabajos. Además, el de generar una satisfacción de los requerimientos de las empresas contratistas hacia sus clientes.

Las inspecciones topográficas a tanques de almacenamiento según el API 653, se divide en dos:

- Inspecciones topográficas a un tanque de almacenamiento – externo.
 - Verticalidad – API 653: Section 10 – 10.5.2. Plumbness
 - Redondez – API 653: Section 10 – 10.5.3. Roundness
 - Asentamiento – API 653: Annex B – Evaluation of tank bottom settlement
- Inspecciones topográficas a un tanque de almacenamiento – interno.
 - Asentamiento de borde – API 653: Annex B – B.2.3. Edge settlement
 - Asentamiento y pendiente de fondo – API 653: Annex B – B.2.4. bottom settlement near the tank Shell.
 - Verticalidad de columnas (tanque de techo fijo)

El siguiente documento se centrara en las inspecciones topográficas a tanques de almacenamiento externo y está basado en los siguientes documentos:

- Norma API 653: Tank Inspection, repair, alteration, and reconstruction (Inspección, reparación, Alteración y reconstrucción de tanques de tanques).
- ECP-VIN-M-MEE-GT-010 Evaluación Verticalidad y Redondez en Tanques.

- ECP-VIN-M-MEE-GT-008 Asentamiento en cuerpos de tanques.

Las inspecciones topográficas externas a un tanque de almacenamiento se realizan para evaluar el comportamiento de este ante una posible falla en su estructura las cuales podrían ser:

- Ruptura de la estructura.
- Colapso general de la estructura.
- Rompimientos de soldaduras.
- En tanques de techo flotante se puede presentar daños en los sellos del tanque, provocando así, una caída del techo.



Foto 3. Colapso de estructura del tanque.

Fuente: Internet

La norma API 653 en la sección 10 y el anexo B, establece 3 actividades para evaluar la estructura del tanque en su comportamiento externo (casco del tanque).

6.1. Inspecciones topográficas de verticalidad y redondez a un tanque de almacenamiento.

6.1.1. Procedimiento para la evaluación de Redondez y verticalidad.

La realización de estas dos actividades van muy de la mano, ya que los datos que se toman para redondez funcionan para la evaluación de verticalidad, lo único en que se diferencian es en los valores de aceptación para cada una de ellas las cuales se mencionaran más adelante.

Como se había comentado anteriormente, el API 653 solo menciona los criterios de división de ejes al acuerpo del tanque y las tolerancias dimensionales para cada una de las evaluaciones, pero no menciona ningún procedimiento que se debe realizar en cada una de las etapas del trabajo.

Para la realización de las inspecciones topográficas de redondez y verticalidad a tanques de almacenamiento se ha elaborado el documento:

- Anexo A.1: Guía técnica para evaluaciones de verticalidad y redondez en cuerpo de tanques de almacenamiento atmosféricos.

Este documento técnico menciona cada una de las etapas de los trabajos realizados en relación al estudio de redondez y verticalidad a tanques, los cuales serán mencionados a continuación.

6.1.2. Equipos y materiales.

- Especificaciones de equipos a utilizar (Ver anexo A.2. Especificaciones técnicas de equipos topográficos).
- Información del tanque a inspeccionar (Ver anexo A.3. Data sheet).

6.1.3. Determinación del número de ejes de medición.

En la siguiente tabla se muestran los ejes de medida mínimos recomendados por esta guía según el diámetro del tanque. Como opción el líder de gestión de integridad del negocio puede aumentar el número de ejes de acuerdo al alcance de su estudio.

Tabla 1. Número de ejes de medida.

Diámetro (D) del tanque m (ft)	Ejes mínimos de medida
D 24 (79)	8
24 (79) < D 30 (98)	10
30 (98) < D 43 (141)	14
43 (141) < D 55 (180)	18
55 (180) < D 61 (200)	20
D > 61 (200)	26

Fuente: API 653 (American Petroleum Institute, 2012)

Una vez definidos los ejes de medidas se debe realizar una inspección visual general para asegurar de que las deformaciones apreciables del tanque sean capturados por estos ejes, de lo contrario se deben definir ejes auxiliares.

6.1.4. Determinación de las alturas de medición por anillo.

Para determinar las alturas de medición por anillo en el cuerpo del tanque se debe validar inicialmente la condición de la unión cuerpo-fondo y tomar las medidas a cero (0) metros de altura del tanque, que será la medida teórica de comparación, las demás alturas se tomarán como se muestra a continuación:

Tabla 2. Alturas de medición por anillo en cuerpos de tanques.

Anillos	Medidas	Altura para toma de medidas (m)
1	1	0% h
	2	0.3m o 33% h
	3	66% h
	4	100% h
2	1	33% h
	2	66% h
	3	100% h

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

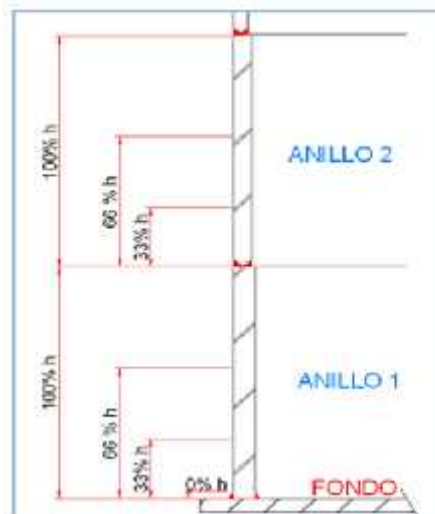


Figura 4. Alturas de medición, conforme a la tabla 2.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

6.1.5. Toma de datos.

La toma de datos se debe realizar externamente y se debe efectuar con tanque vacío para tanques nuevos, reconstruidos y/o reubicados y con el nivel mínimo de operación para tanques en servicio. Se debe asegurar que el nivel del tanque no varíe durante la realización de los trabajos de medición.

- Marcación de los ejes de referencia. A partir de la Tabla 1 se determina el número de ejes, se marcan y enumeran sobre el cuerpo del tanque, iniciando por el lado Norte o por un punto definido dependiendo de estudios anteriores y en sentido horario para facilitar la trazabilidad en la toma de las mediciones.
- Armar y nivelar el equipo topográfico en un punto de referencia ortogonal al eje de interés, configurar y verificar que las unidades estén en metros. Las mediciones tomadas deben ser con precisión al milímetro.
- Con el equipo de topografía localizar el eje de interés, bloquear el movimiento horizontal del equipo para que este quede fijo, es decir, que solo se pueda mover en su eje vertical luego se comienza a tomar distancias horizontales a lo largo del eje en cada uno de los anillos en los porcentajes referenciados en la Tabla 2.

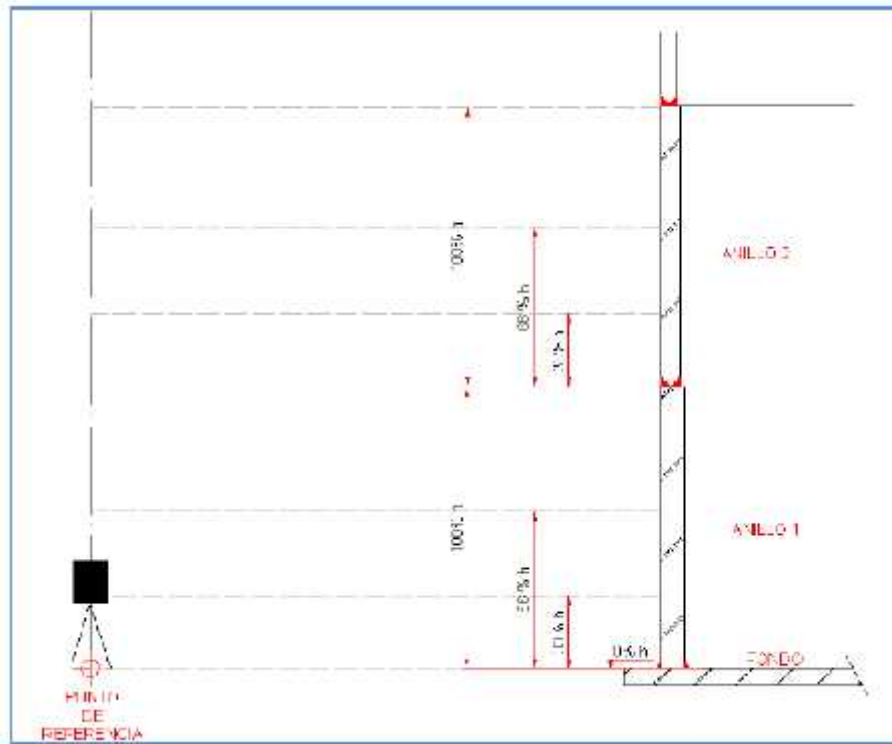


Figura 5. Medición de distancias horizontales.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

- Los datos tomados se almacenan en el formato (Ver anexo A.4. Toma de datos de verticalidad y redondez).

6.1.6. Análisis y cálculo de la información.

A los datos tomados en campo y que fueron llenados en el formato (Ver anexo A.4. Toma de datos de verticalidad y redondez) y dependiendo de la configuración de las láminas del cuerpo del tanque se deberá usar el archivo correspondiente, es decir:

- Si las láminas están alineadas por el eje central (Ver Figura 6), se usará el formato (Anexo A.5. Calculo de redondez y verticalidad para laminas que están alineadas por el eje central), a las cuales se le debe sumar la mitad del espesor de la lámina en cada anillo.

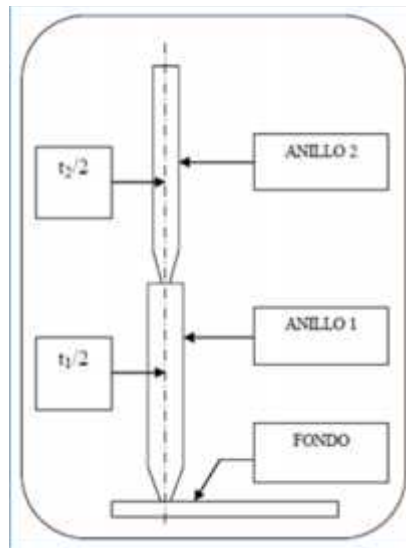


Figura 6. Láminas alineadas por el eje

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

- Y si las láminas están alineadas por el lado interno (Ver Figura 7), se usará el formato (Anexo A.6. Calculo de redondez y verticalidad para laminas que están alineadas por el lado interno), a las cuales se les debe sumar todo el espesor de la lámina en cada anillo.

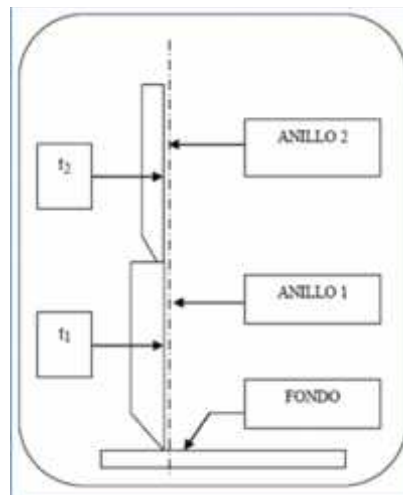


Figura 7. Láminas alineadas por lado interno.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014).

Las mediciones anteriores ya corregidas tomadas al 0% del primer anillo y al 100% del último anillo en cada eje se utilizan para determinar la verticalidad del tanque. (Cuando la parte superior del tanque y/o el ángulo bocel esta deformada se toma el dato del 66% del último anillo para todos los ejes).

6.1.6.1. *Perdida de verticalidad.*

La diferencia entre la medición al 0% del primer anillo y el 100% del último anillo determinan qué tan alejada está la medida respecto a la tolerancia establecida. La tolerancia varía dependiendo de la condición del tanque, es decir, si es nuevo, reconstruido o en servicio y se calcula dividiendo la altura del tanque en milímetros sobre 100 o 200 según aplique.

$$\frac{h}{100} \text{ o } \frac{h}{200}$$

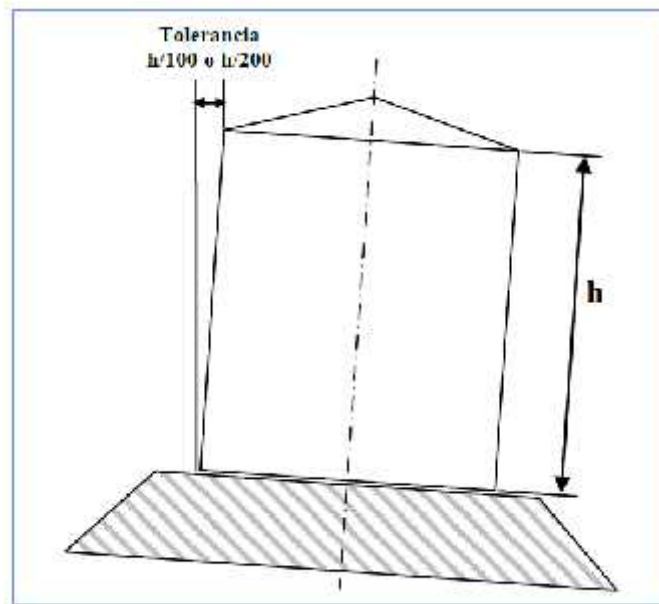


Figura 8. Tolerancia de pérdida de verticalidad en el cuerpo del tanque.
Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014).

6.1.6.2. Pérdida de redondez.

La diferencia entre las medidas de los radios (desviaciones entre la circunferencia teórica y la real) en cada anillo a cada altura y en cada eje del cuerpo del tanque, dependiendo de la condición del tanque (nuevo, reconstruido, reubicado o en servicio) da como resultado el valor de pérdida de redondez en cada anillo del cuerpo del tanque.

6.1.7. Evaluación de verticalidad y redondez en cuerpo de tanques de almacenamiento.

Dependiendo del tipo de evaluación que se le otorgue al tanque (si es nuevo, reconstruido, reubicado o en servicio) que serán mencionadas a continuación, se usara el formato (Ver anexo A.7. Evaluación de verticalidad y redondez).

6.1.7.1. Verticalidad y redondez en cuerpos de tanques nuevos.

Conforme a los estándares de construcción, es requerido tomar los datos de verticalidad y redondez de cuerpos de tanques y compararlos con las tolerancias dimensionales especificadas en esta guía, de esta forma se asegura el recibo de un tanque de apariencia aceptable y que cumple lo requerido para operar con integridad estructural. A continuación se describen las tolerancias de aceptación solicitadas en la realización de esta evaluación:

- La máxima pérdida de verticalidad del cuerpo del tanque medida desde la pestaña del fondo hasta el techo del mismo no debe exceder $h/200$ del total de la altura del tanque. Aplica para todos los diámetros.

- La pérdida de verticalidad tomada en cada uno de los anillos del cuerpo no debe exceder las variaciones permisibles especificadas en las normas ASTM A6M/A6, ASTM A20M/A20, o ASTM A480M/A480. Aplica para todos los diámetros.
- Radios medidos a 0.3 metros (1 ft) por encima de la soldadura casco/fondo no deben exceder las tolerancias de la Tabla 3. Si durante la fabricación del tanque se especifica el requerimiento de toma de medidas radiales adicionales por encima de 0.3 metros, la tolerancia será 3 veces la mostrada en dicha tabla.
- Si después de la realización de este estudio no se cumple con alguno de los ítems descritos arriba, se debe solicitar al constructor del tanque realizar los trabajos requeridos para que todos los parámetros dimensionales (verticalidad y redondez), se encuentren dentro de las tolerancias requeridas para tanques nuevos descritos en esta guía.

Tabla 3. Tolerancias para medición de redondez en tanques nuevos.

Diámetro (D) del tanque-m (ft)	Tolerancia radial a 0.3 m de la unión cuerpo/fondo mm (in)
D 12 (40)	±13 (1/2)
12 (40) < D < 45 (150)	±19 (3/4)
45 (150) < D < 75 (250)	±25 (1)
D 75 (250)	±32 (1¼)

Fuente: (American Petroleum Company, 2012)

6.1.7.2. Verticalidad y redondez en cuerpos de tanques reconstruidos y/o reubicados.

Cuando se requiere dismantelar y reconstruir un tanque o simplemente reubicarlo es requerido tomar los datos de verticalidad y redondez previo a la puesta en servicio

nuevamente y se deben comparar con las tolerancias dimensionales especificadas en esta guía, de esta forma se asegura el retorno a la operación de un tanque con apariencia aceptable y que cumple lo requerido en cuanto a su integridad estructural. A continuación se describen las tolerancias de aceptación solicitadas en la realización de esta evaluación:

- La máxima pérdida de verticalidad del cuerpo del tanque medida desde la pestaña del fondo hasta el techo del mismo no debe exceder $h/100$ del total de la altura del tanque en milímetros, con un valor máximo de 127 mm (5 in). Para tanques con techos flotantes internos el criterio es $h/200$ del total de la altura del tanque en milímetros.
- La pérdida de verticalidad tomada en cada uno de los anillos del cuerpo del tanque no debe exceder los valores especificados en las normas ASTM A6 o ASTM A20, la que aplique.
- Radios medidos a 0.3 metros (1 ft) por encima de la soldadura casco/ fondo y en el resto del cuerpo del tanque no debe exceder las tolerancias de la Tabla 4.

Tabla 4. Tolerancias para medición de redondez en tanques reconstruidos y/o reubicados.

Diámetro (D) del tanque-m (ft)	Tolerancia radial a 0.3 m de la unión cuerpo/fondo mm (in)	Tolerancia radial por encima de 0.3 m de la unión cuerpo/fondo mm (in)
D 12 (40)	±13 (1/2)	±39 (1 ½)
12 (40) < D < 45 (150)	±19 (3/4)	±57 (2 ¼)
45 (150) < D < 75 (250)	±25 (1)	±75 (3)
D 75 (250)	±32 (1¼)	±96 (3 ¼)

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

- Si después de la realización de este estudio no se cumple con alguno de los ítems descritos arriba, se deben realizar los trabajos metalmecánicos requeridos para que todos los parámetros dimensionales (verticalidad y redondez) se encuentren dentro de las tolerancias requeridas para tanques reconstruidos y/o reubicados descritos en esta guía.
- Para tanques reubicados debe realizarse la evaluación de verticalidad y redondez previo a su reubicación, con el fin de determinar su estado actual y comparar con las medidas finales del tanque reubicado, de esta forma se asegura que la integridad del tanque no se afectó por el trabajo de reubicación. En caso contrario se deben definir las acciones requeridas para asegurar la integridad del tanque.

6.1.7.3. Verticalidad y redondez en cuerpos de tanques en servicio.

De acuerdo con los estándares actuales de inspección, reparación y alteración de tanques en servicio aplicados a la industria del petróleo no se especifican criterios de aceptación o rechazo en cuanto a la evaluación de verticalidad y redondez de cuerpos de tanques en servicio. Sin embargo, en esta guía se dan los parámetros de comparación y seguimiento en cuanto a tolerancias dimensionales se refiere para asegurar un tanque con apariencia aceptable, garantizar el funcionamiento de los techos flotantes y sellos (internos y externos) y que opere con integridad estructural. A continuación se describen las tolerancias de aceptación solicitadas en la realización de esta evaluación:

- La máxima pérdida de verticalidad del cuerpo del tanque medida desde la pestaña del fondo hasta el techo del mismo no debe exceder $h/100$ del total de la altura del tanque. Este criterio aplica para tanques con techos flotantes internos.

- Para analizar los datos de pérdida de redondez se debe tener en cuenta los radios medidos a 0.3 m por encima de la soldadura casco/fondo y en el resto del cuerpo del tanque de acuerdo a las tolerancias de la Tabla 4 y dependiendo del espesor de las láminas en cada uno de los anillos del cuerpo se deben sumar las tolerancias de la Tabla 5 según aplique. Este resultado será la tolerancia de redondez en cada anillo.

Tabla 5. Tolerancias para medición de redondez de tanques en servicio de acuerdo al espesor de la lámina en el cuerpo del tanque.

Espesor (t) de la lámina en el anillo del cuerpo mm (in)	Máxima desviación local de la forma de diseño mm (in)
t ≤ 12.5 (1/2)	16 (0.63)
12.5 (1/2) < t ≤ 25 (1)	13 (0.51)
t > 25 (1)	10 (0.39)

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

Si después de la realización de esta evaluación no se cumple con alguno de los ítems descritos arriba, se debe realizar lo siguiente:

- Si los datos de verticalidad están por fuera de las tolerancias aquí descritas se debe tomar el asentamiento del cuerpo conforme al documento (Anexo B.1. Guía técnica para estudio de asentamientos de cascos de tanques de almacenamiento), dependiendo de los resultados de este estudio se debe considerar re-nivelar el tanque.
- Verificar el desempeño de los sellos, los techos y/o membranas internas flotantes de los tanques y hacer seguimiento a su funcionamiento cada mes, o de acuerdo a la ronda operativa, la que sea más estricta.

- Realizar seguimiento a los datos de verticalidad y redondez cada seis meses, si los datos que están por fuera de las tolerancias se mantienen dentro de los rangos iniciales medidos y no han evidencia de que el desempeño de los sellos y membranas estén afectados, se puede continuar con la operación normal del tanque y se deben establecer frecuencias de monitoreo de acuerdo a la condición del tanque con periodo no mayor a un año.
- Si durante el seguimiento de los datos que están por fuera de tolerancias se observa que aumentan, se deben realizar una de las siguientes opciones:
 - Identificar la causa raíz para establecer los trabajos de mantenimiento y dar prioridad a la salida del tanque para su intervención y realizar los trabajos metalmecánicos requeridos para que todos los parámetros dimensionales (verticalidad y redondez) se encuentren dentro de las tolerancias requeridas para tanques en servicio descritos en esta guía.
 - Priorizar aquellos tanques con aditamentos internos, ya que las pérdidas de verticalidad y redondez pueden afectar el funcionamiento de los techos flotantes o membranas en comparación con los tanques que no cuentan con aditamentos interno.
 - Realizar un estudio de aptitud para el servicio conforme al estándar “API 579–1/ASME-1 Fitness For Service (FFS) nivel II o nivel III, Parte 8: Análisis de soldaduras desalineadas y distorsiones en el cuerpo y Anexo B1: Análisis de esfuerzos para un estudio FFS”. De acuerdo a los resultados y recomendaciones de este estudio se confirmará que los parámetros dimensionales del tanque

(verticalidad y redondez) cumplen o no con lo requerido para operar con integridad estructural. Si el resultado es positivo el estudio FFS debe dar las nuevas tolerancias en cuanto a verticalidad y redondez que aseguren su integridad estructural. Si el resultado es negativo se deben realizar los trabajos metalmecánicos requeridos para recuperar la verticalidad y redondez cumpliendo con las tolerancias requeridas para tanques en servicio descritos en esta guía.

6.1.7.4. Notas adicionales.

Cuando las evaluaciones de verticalidad y redondez en tanques en servicio den como resultados medidas por fuera de los valores permisibles, se recomienda que se realicen los siguientes pasos:

- Corroborar que se está utilizando información confiable (validación de los datos obtenidos).
- Consultar la historia de desempeño del tanque.
- Verificar otras posibles causas de pérdida de verticalidad y redondez como taponamiento de venteos, falla en operación de las válvulas de presión / vacío, dimensionamiento inadecuado de las válvulas P/V o cuellos de ganso, sobrellenados, calibración inadecuadas de las válvulas, cambio de las ventanas operativas que impacten la capacidad de los venteos, etc.
- En tanques con techo flotante o membrana interna flotante, hacer una evaluación de asentamientos y descartar o confirmar la afectación en el desempeño de los sellos.

- Realizar evaluaciones más rigurosas, como por ejemplo análisis de ingeniería o modelos de análisis por elementos finitos (Fitness for service nivel 3).
- Evaluar la opción de restringir el nivel de llenado del tanque mientras se analiza la causa raíz de pérdida de verticalidad y redondez y se define la estrategia de mantenimiento a seguir.
- En casos donde la historia del tanque muestre un desempeño adecuado, se debe realizar el seguimiento a la operación del tanque (desempeño de los sellos e internos) y se debe continuar con el monitoreo a las mediciones de verticalidad y redondez.

6.1.7.5. Tablas comparativas de tolerancias para evaluación de verticalidad y redondez en cuerpos de tanques.

En las Tablas 6 y 7 se describen las tolerancias para la evaluación de verticalidad y redondez en cuerpos de tanques.

Tabla 6. Comparación de tolerancias para verticalidad en cuerpos de tanques.

Tipo de tanque	Nivel de llenado para toma de medidas	Tolerancia para tanques de techos fijos	Tolerancia para tanques de techos flotantes externos	Tolerancia para tanques de techos flotantes internos
Verticalidad de tanques nuevos	Tanque vacío		h/200	
Verticalidad de tanques reconstruidos y/o reubicados	Tanque vacío	h/100, con un máximo de 127 mm (5 in)		h/200
Verticalidad de tanques en servicio	Nivel mínimo de operación y estable		h/100 (validando la historia del desempeño del tanque)	

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

Tabla 7. Comparación de tolerancias para redondez en cuerpos de tanques.

Tipo de tanque	Nivel de llenado para toma de medidas	Tolerancia para tanques de techos fijos	Tolerancia para tanques de techos flotantes externos	Tolerancia para tanques de techos flotantes internos
Verticalidad de tanques nuevos	Tanque vacío	Ver Tabla 3. Tolerancias para medición de redondez en tanques nuevos		
Verticalidad de tanques reconstruidos y/o reubicados	Tanque vacío	Ver Tabla 4. Tolerancias para medición de redondez en tanques reconstruidos y/o reubicados		
Verticalidad de tanques en servicio	Nivel mínimo de operación y estable	Aplican las tolerancias de la Tabla 4 y se deben sumar las tolerancias de la Tabla 5 “Tolerancias para medición de redondez en tanques en servicio de acuerdo al espesor de la lámina en el cuerpo del tanque” (Validando la historia del desempeño del tanque)		

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

6.1.8. Representación gráfica de verticalidad y redondez.

Para visualizar los resultados en cada una de las evaluaciones realizadas tanto para verticalidad y redondez, se usara los siguientes formatos en archivo .dwg de AUTOCAD.

- Anexo A.8. Representación gráfica de redondez.
- Anexo A.9. Representación gráfica de verticalidad.

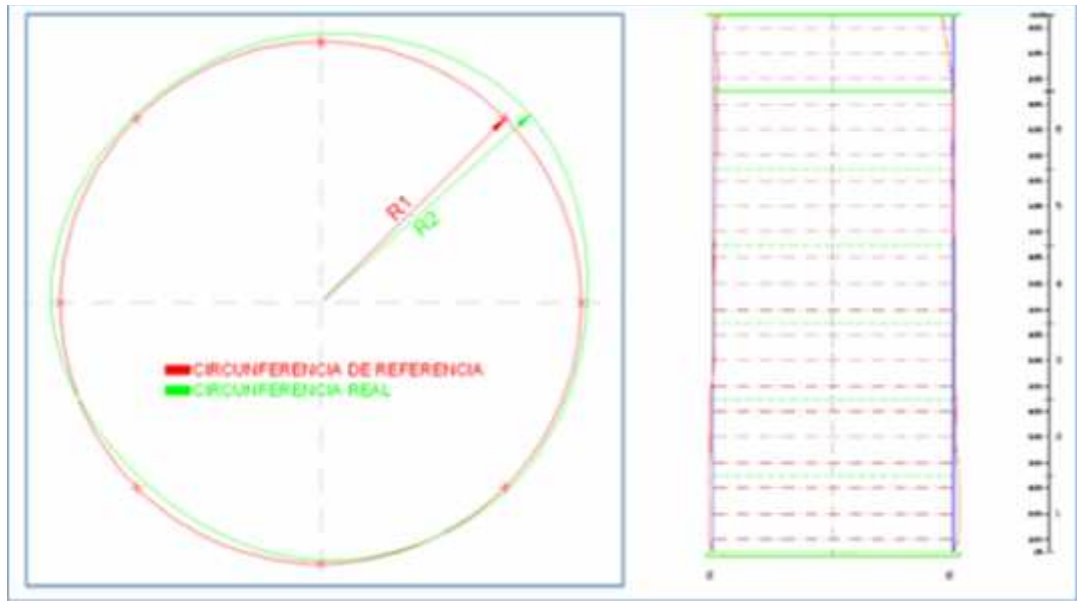


Figura 9. Tolerancia de pérdida de verticalidad y redondez en el cuerpo del tanque.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

6.1.9. Entrega final.

Toda la información que se ha tomado, analizado y calculado, se almacena en los respectivos formatos, los cuales serán los entregables a la empresa que contrato el servicio.

- Anexo A.7. Evaluación de verticalidad y redondez.
- Anexo A.8. Representación gráfica de redondez.
- Anexo A.9. Representación gráfica de verticalidad.
- Anexo A.10. Informe final de evaluación de verticalidad y redondez del tanque.

Ecopetrol S.A., (2014), “*Guía técnica para evaluaciones de verticalidad y redondez en cuerpos de tanques de almacenamiento atmosféricos*”, Cartagena, Ecopetrol S.A.

6.2. Inspección topográfica de asentamiento a un tanque de almacenamiento

Los estudios de asentamientos de cascos de tanques se pueden realizar en diferentes condiciones, como son:

- Tanques en servicio, a diferentes alturas de llenado.
- Tanques en mantenimiento durante las pruebas hidrostáticas, a diferentes alturas de llenados.

Los estudios de asentamientos de cascos de tanques se realizan en dos etapas:

- Toma de datos de campo.
- Cálculos de oficina y elaboración del informe.

En este tipo de estudios, la precisión de los datos es un aspecto fundamental que impacta en los resultados; por tanto, se debe tomar todas las prevenciones para asegurar la calidad de la información recolectada.

En cuanto al personal que realiza la toma de datos, los cálculos y la interpretación de los resultados, debe ser personal con experiencia certificada en estas actividades. Igualmente, el informe debe ser avalado por un inspector API 653 certificado.

6.2.1. Procedimiento para la evaluación de asentamiento.

Para la realización de la inspección topográfica de asentamiento a tanques de almacenamiento se ha elaborado el documento:

- Anexo B.1: Guía técnica para estudio de asentamientos a cascos de tanques de almacenamiento.

Este documento técnico menciona cada una de las etapas de los trabajos realizados en relación al estudio de asentamiento a tanques, los cuales serán mencionados a continuación.

6.2.2. Equipos y materiales.

- Especificaciones de equipos a utilizar (Ver anexo B.2. Especificaciones técnicas de equipos topográficos).
- Información del tanque a inspeccionar (Ver anexo B.3. Data sheet).

6.2.3. Definición de los puntos sobre la periferia del casco.

El número mínimo de puntos sobre la periferia del casco del tanque para evaluar el asentamiento, según API 653 debe ser el mayor de:

- 8 puntos.
- El requerido para asegurar una separación máxima de 32 pies (9754 mm), medido en la periferia del tanque.
- El definido por la fórmula:

$$N = \frac{D}{10}$$

Donde:

D= Diámetro del tanque en pies.

N= Número de puntos, el cual debe ser redondeado al siguiente número entero.

- Si se han realizado inspecciones topográficas de verticalidad y redondez, se pueden usar esos ejes.

Según el nivel de asentamientos, es posible que se requiera un número mayor de puntos para toma de datos con el fin de hacer una mejor evaluación; por lo tanto, se recomienda que se utilice el doble de los puntos definidos con el criterio del API 653. En la tabla 1, se muestran los puntos mínimos recomendados para esta guía según el diámetro del tanque.

Tabla 8. Puntos mínimos recomendados para toma de datos sobre la periferia del tanque.

Diámetro del tanque (ft)	Mínimo de puntos	Número de puntos con separación máxima 32 ft	Número puntos D/10	Número de puntos (mayor anteriores)	Recomendado por esta guía
30	8	3.0	3	8	16
50	8	5.0	5	8	16
80	8	8.0	8	8	16
100	8	10.0	10	10	20
140	8	14.0	14	14	28
180	8	18.0	18	18	36
200	8	20.0	20	20	40
250	8	25.0	25	26	52

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

6.2.4. Ubicación del punto de lectura del asentamiento sobre el casco.

El punto de lectura debe ser lo más representativo del nivel inferior de la lámina del primer anillo, ya que con base en este nivel, es que se ha desarrollado toda la formulación que refieren las normas. Debido a que esta zona está al lado de la soldadura externa de

casco-fondo, se puede utilizar una de las siguientes opciones para tomar el nivel de cada punto.

- Para tanques nuevos y en mantenimiento, se recomienda instalar una platina testigo a 30 cm de la parte inferior de la lámina, con el objeto que cuando el tanque se haya construido, se tenga una referencia fija para las medidas del nivel.

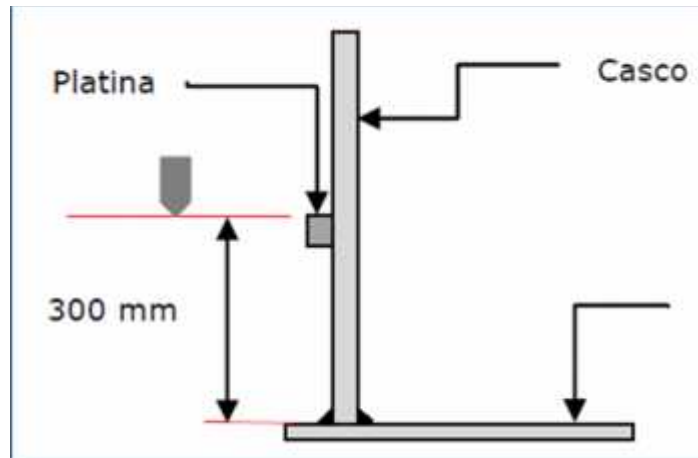


Figura 10. Esquema de medición con platina testigo soldada.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

La lectura del nivel inferior de la lámina del casco debe ser corregido. (Ver anexo B.4. Formato- Toma de niveles para tanques).

Nota: Se debe tener en cuenta que no todas las platinas quedarán instaladas o están instaladas al mismo nivel, por lo tanto, se debe hacer esta lectura por cada platina.

- Para tanques en servicio, debido a que no se puede instalar la platina testigo, se recomienda el uso de una herramienta para leer el nivel de la base de la soldadura unión fondo-casco.

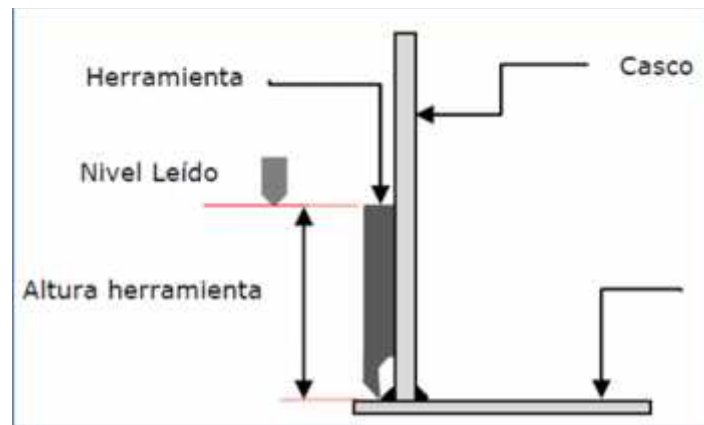


Figura 11. Esquema de medición con herramienta.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

La lectura del nivel inferior de la lámina del casco debe ser corregido. (Ver anexo B.4. Formato- Toma de niveles para tanques).

No es permitido, tomar los niveles en los siguientes sitios cuando se trate de recolectar información.

- En la pestaña del fondo del tanque.
- Sobre el anillo de cimentación del tanque.

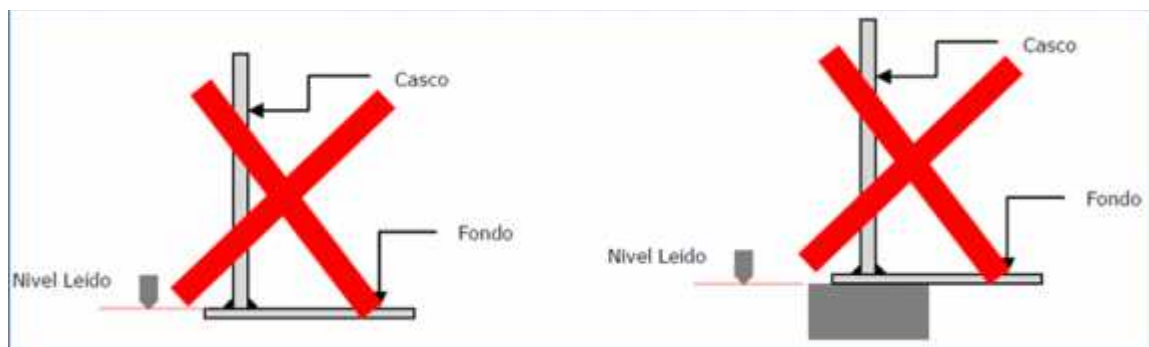


Figura 12. Esquema de mediciones no aceptadas.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

6.2.5. Toma de niveles de los puntos definidos sobre el casco.

La toma de los niveles de los puntos definidos en el casco, se deben realizar de acuerdo a lo definido en el numeral anterior y con equipos de precisión. Por otra parte, se debe asegurar que el tránsito del equipo sobre los cambios (BM) no genere error en la lectura de los niveles, por lo que el error máximo en el cierre de la nivelación no deberá exceder 1mm.

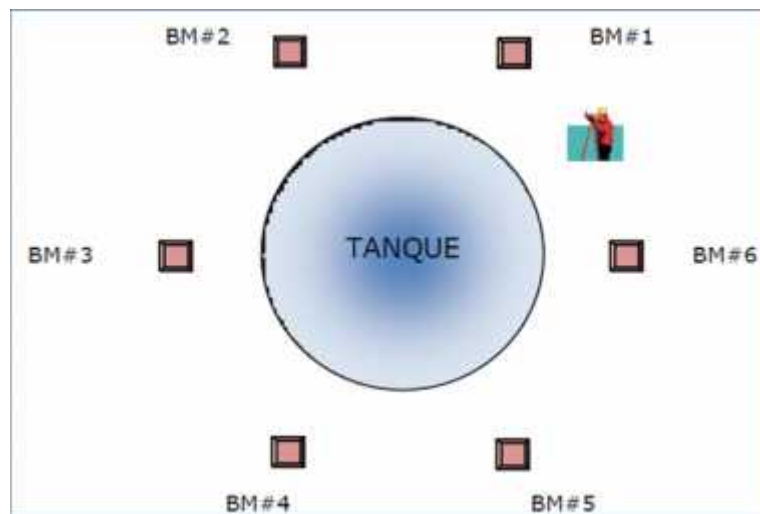


Figura 13. Toma de niveles según puntos definidos.

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

Los datos tomados en campo y otra información adicional necesaria a la hora de hacer los cálculos se deben diligenciar en el Formato (Ver anexo B.4. Formato- Toma de niveles para tanques).

6.2.6. Ajustes de los datos leídos a curva tipo coseno.

Para encontrar la curva optima de ajuste, se deben realizar los cálculos que se encuentran en la macro de Excel. (Ver anexo B.5. Cálculo de asentamiento por curva optima). Seleccionando la pestaña del número de ejes que posea el tanque en estudio. Donde:

- **n:** Número de puntos leídos.
- **Localización (θ):** Localización del punto sobre la periferia del casco del tanque, en grados.
- **Nivel corregido Y (i):** Nivel de cada uno de los puntos, después de hacer la corrección según el procedimiento de lectura de los niveles en campo.
- **A0:** Equivale al promedio de los niveles de los puntos $A0 = \text{SUM1}/N$.
- **Z (i):** Equivale a la diferencia entre los niveles Y (i) y el promedio de los niveles A0, $Z(i)=Y(i)-a0$, en mm.
- **SUM2:** Equivale a la sumatoria de $Z (i)*\text{Cos} (\theta)$ de los puntos, en mm.
- **SUM3:** Equivale a la sumatoria de $Z (i)*\text{Sen} (\theta)$ de los puntos, en mm.
- **SY Y:** Varianza (cuadrado de la desviación estándar) de los niveles corregidos Y (i).
- **A1:** Es el doble del promedio de los valores de $Z (i)*\text{Cos} (\theta)$. $A1= 0*\text{SUM2}/n$.
- **B1:** Es el doble del promedio de los valores de $Z (i)*\text{Sen} (\theta)$. $B1= 0*\text{SUM3}/n$.
- **Rotación planar:** Es la suma de los componentes $A1*\text{Cos} (\theta)+B1*\text{Sen} (\theta)$.
- **Asentamiento diferencial (i):** Es la diferencia entre el valor Z (i) y la rotación planar (i) para cada punto leído.

- **Curva ajustada coseno (i):** Es la diferencia entre el nivel corregido Y (i) y el asentamiento diferencial (i) para cada punto leído.
- **SSE:** Es la sumatoria del cuadrado de las diferencias entre el nivel corregido Y (i) y los valores de la curva ajustada coseno (i), para cada punto leído.
- **R²:** Valor de correlación entre los valores corregidos Y (i) y los de la curva ajustada coseno (i). $R^2 = (SSY - SEE) / SYY$.

Nota: El valor de la correlación debe ser igual o mayor a 0.9 para que sea válido el ajuste y poder tomar decisiones basados en la curva ajustada coseno.

6.2.7. Análisis de deflexión fuera del plano basados en la curva ajustada tipo coseno.

La descripción de este método, equivale al indicado en el numeral B.3.2.1. Del apéndice B del API 653.

El procedimiento definido en este numeral es válido, siempre y cuando el valor de la correlación de los puntos ajustados a la curva tipo coseno (R²), es mayor o igual a 0.9; de lo contrario se debe utilizar los procedimientos definidos en el numeral 6.2.8.

La deflexión fuera del plano, está definido como:

$$S_i = U_i - (1/2 U_i - 1 + 1/2 U_i + 1) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

S_i= Es la deflexión fuera del plano en el punto i.

U_i= Asentamiento diferencial en el punto i.

U_{i+1} = Asentamiento diferencial en el punto siguiente al punto evaluado (i+1).

U_{i-1} = Asentamiento diferencial en el punto anterior al punto evaluado (i-1).

Nota: Cuando se está evaluando el primer punto (i=1), el punto anterior se debe entender como el último punto i=n. Cuando se está evaluando el último punto (i=n), el punto siguiente se debe entender como el primer punto (i=1).

Debido a que se están tomando el doble de los puntos recomendados por el API 653 para tener una mejor curva ajustada tipo coseno; esto implica que si se toma esta misma cantidad de puntos para estimar la deflexión fuera del plano permisible, esta va a ser muy pequeña; toda vez que este valor depende de la separación de los puntos leídos sobre la periferia del tanque (longitud de arco). Por lo anterior, es aceptable por el API 653 (numeral B.2.2.4) desarrollar la curva ajustada tipo coseno con el 100% de los puntos leídos, pero solo utilizar los puntos mínimos recomendados por la misma norma cuando calcule las deflexiones fuera del plano. Por lo tanto, la ecuación para calcular la deflexión fuera del plano en este caso sería:

$$S_i = U_i - (1/2 U_{i-2} + 1/2 U_{i+2}) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Con lo anterior, se continúa completando el archivo de Excel. (Ver anexo B.5. Cálculo de asentamiento por curva optima). Los valores calculados de la deflexión fuera del plano (S_i) calculados para cada punto, se deben comparar con el valor admisible definido por el API 653, numeral 3.2.1.

$$S_{\text{máx. fl.}} = \frac{(L^2 \times Y \times 11)}{2[(E \times H)]} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

$S_{\text{máx}}$ = Es el valor máximo de la deflexión fuera del plano (ft).

L = Longitud de arco entre los puntos medidos (ft).

Y = Esfuerzo de fluencia del material del casco del tanque (lb/pul²).

E = Modulo de Young del acero (lb/pul²).

H = Altura del tanque (ft).

Estos son algunos de los valores típicos, según los materiales más utilizados en la fabricación de tanques:

Tabla 9. Valores módulo Young y esfuerzo fluencia para materiales de tanques.

Tipo de material del casco del tanque	Módulo de Young (lb/pul ²)	Esfuerzo de fluencia (lb/pul ²)
A-36		3600
A-283 Gr C	2,9 x 10 ⁷	3600
1-285 Gr C		3600
A-516 Gr 70		3600

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

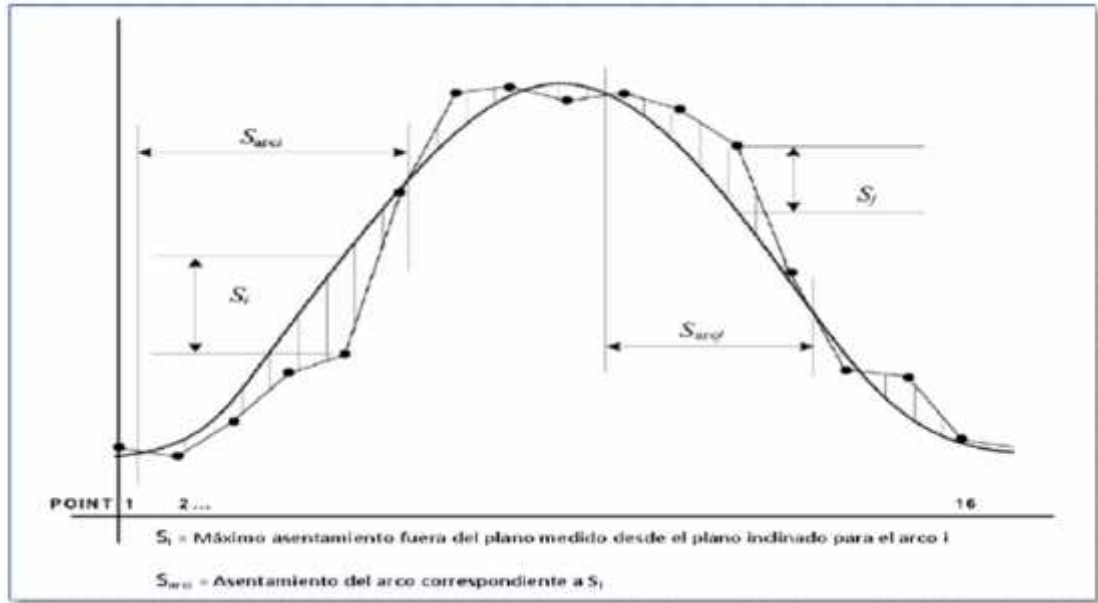


Figura 14. Verificación de deflexión fuera del plano sobre curva tipo coseno.

Fuente: API 653 (American Petroleum Institute, 2012)

6.2.8. Método alternativo para verificar deflexión fuera del plano permisible en curvas ajustadas tipo coseno.

Primero se debe calcular nuevamente la deflexión fuera del plano basado en la gráfica y no por medio de fórmulas, como se aplica en el numeral anterior.

El procedimiento es el siguiente:

- Graficar los datos leídos.
- Graficar la curva ajustada tipo coseno.
- Identificar los puntos de cruce entre la curva ajustada y la de los datos leídos.
- Identificar las longitudes de arco S_{arco} entre los puntos de cruce de las dos curvas graficadas.
- Identificar los asentamientos fuera del plano máximos S_i para cada longitud de arco.

Así entonces se tiene una serie de longitudes de arco S_{arci} y unos asentamientos máximos fuera del plano S_i para cada longitud de arco.

Tabla 10. Longitudes de arco y asentamientos fuera del plano.

Longitud de arco (ft)	Asentamiento máximos fuera del plano S_i de la longitud de arco (ft)
S_{arci}	S_i
S_{arcj}	S_j
S_{arck}	S_{arck}

Fuente: (Ecopetrol S.A., 2014)

Las anteriores, se deben comparar con el máximo permisible definido en el numeral B.3.2.2. Del apéndice B del API 653.

$$S_{max, in} = \min \left[K \times S_{arc} \times \left(\frac{D}{H} \right) \times \left(\frac{Y}{E} \right), 4.0 \right] \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

S_{max} = Es el asentamiento permisible fuera del plano (in).

S_{arc} = Es la longitud de arco del asentamiento evaluado (ft).

D= Es el diámetro del tanque (ft).

Y= Es el esfuerzo de fluencia del material del casco (lb/pul²).

E= Es el módulo de Young del acero (lb/pul²).

H: Es la altura del tanque (ft).

K= Constante que depende del diámetro del tanque y tipo de techo.

Tabla 11. Constante K para tanques según diámetros y tipos de techos.

Diámetro del tanque (ft)	Constante K, para tanque de techo abierto	Constante K, para tanques de techo fijo
D ≤ 50	28.7	10.5
50 < D ≤ 80	7.8	5.8
80 < D ≤ 120	6.5	3.9
120 < D ≤ 180	4.0	2.3
180 < D ≤ 240	3.6	No aplica
240 < D ≤ 300	2.4	No aplica
300 < D	No aplica	No aplica

Fuente: (American Petroleum Institute, 2012)

6.2.9. Método alternativo para verificar deflexión fuera del plano permisible cuando no es posible obtener curva ajustada tipo coseno.

El procedimiento aquí indicado es el que está definido en el numeral B.2.2.5 del apéndice B del API 653.

Este es un procedimiento alternativo cuando no es posible obtener una curva ajustada tipo coseno, y es considerado por la norma un procedimiento válido antes de proceder a un estudio más avanzado o la toma de la decisión de reparar.

Para poder aplicar este método, las longitudes de arco entre los puntos de asentamiento, S_{arc} , y los asentamientos fuera del plano S_i , deben ser determinados directamente sobre la gráfica de los puntos leídos, completando el archivo de Excel (Ver anexo B.6. Cálculo de asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno).

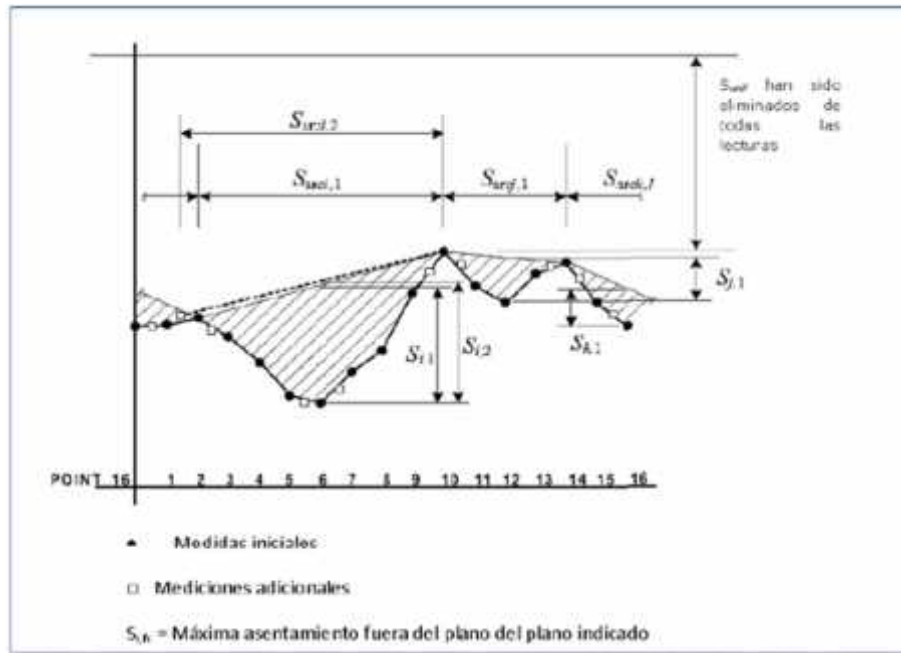


Figura 15. Representación gráfica de asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.

Fuente: API 653 (American Petroleum Institute, 2012)

Ecopetrol S.A., (2014), “*Guía técnica para estudio de asentamientos de cascos de tanques de almacenamiento*”, Cartagena, Ecopetrol S.A.

6.2.10. Entrega final.

Toda la información que se ha tomado, analizado y calculado, se almacena en los respectivos formatos (dependiendo del tipo de asentamiento usado), los cuales serán los entregables a la empresa que contrato el servicio.

- Anexo B.7. Evaluación de asentamiento por curva óptima.
- Anexo B.8. Evaluación de asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.

- Anexo B.9. Informe final de evaluación de asentamiento por curva óptima.
- Anexo B.10. Informe final de evaluación de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.

6.3. Formatos adicionales

En muchas de las ocasiones el cliente no solo solicita una evaluación topográfica de verticalidad y redondez o de asentamiento a un tanque de almacenamiento, si no que solicita un trabajo completo, por lo tanto, manejaran las siguientes entregas finales, las cuales dependen del tipo de formato de asentamiento utilizado.

6.3.1. Entrega final para evaluaciones topográficas completas a tanques de almacenamiento usando asentamiento por curva óptima.

- Anexo A.7. Evaluación de verticalidad y redondez.
- Anexo A.8. Representación gráfica de redondez.
- Anexo A.9. Representación gráfica de verticalidad.
- Anexo B.7. Evaluación de asentamiento por curva óptima.
- Anexo C.1. Informe final de evaluación topográfica completa a tanque de almacenamiento usando asentamiento por curva óptima.

6.3.2. Entrega final para evaluaciones topográficas completas a tanques de almacenamiento usando asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.

- Anexo A.7. Evaluación de verticalidad y redondez.
- Anexo A.8. Representación gráfica de redondez.
- Anexo A.9. Representación gráfica de verticalidad.
- Anexo B.8. Evaluación de asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.
- Anexo C.2. Informe final de evaluación topográfica completa a tanque de almacenamiento usando asentamiento de casco con plano de inclinación no acorde a una curva coseno.

7. Conclusiones

La elaboración del anterior sistema de gestión de calidad para trabajos de inspección topográfica a tanques de almacenamiento reduce en un 50% la elaboración de este tipo de actividades, el cual quedo demostrado en el anexo IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CALIDAD: Evaluación de Verticalidad, redondez y asentamiento a un tanque ejemplo.

Cuando se realiza adecuadamente cada uno de los pasos mencionados en los procedimientos y usando los formatos de cálculos respectivos, se genera un reporte de calidad el cual genera una confiabilidad en los datos entregados al cliente.

Hay que tener en cuenta que los resultados que se obtienen mediante la evaluación en la inspección topográfica a tanques de almacenamiento son analizados posteriormente por un ingeniero certificado API 653, y con el apoyo del profesional que realizo la inspección, darán los criterios y/o comentarios de lo que se le debe realizar al tanque.

El desempeño del tanque puede verse afectado cuando existen asentamientos significativos fuera del plano. La falta de redondez puede impedir el funcionamiento del techo flotante y también afectar a las estructuras que soportan el techo. La falta de redondez que un tanque experimenta cuando tiene asentamiento fuera del plano es muy sensible al patrón del asentamiento que tiene el tanque. Por lo anterior, para los tanques con asentamientos importantes por fuera del plano, se debe especificar una inspección adicional o una evaluación de verticalidad y redondez del tanque, con el fin de verificar o descartar un problema con el sello de los techos flotantes y/o membranas internas flotantes.

Cuando los asentamientos calculados con base en los niveles leídos en los puntos definidos para el estudio indican que existen puntos en los cuales se supera el asentamiento

permisible, se debe realizar una evaluación más rigurosa para determinar la necesidad de ejecutar una reparación, ya que estas últimas son costosas y pueden generar esfuerzo importantes a la estructura del tanque durante su ejecución. Esta evaluación debe ser realizada por un ingeniero experimentado en análisis de asentamiento en tanques y siempre debe consultarse el comportamiento de la estructura durante su historia de servicio antes de tomar una decisión sobre una reparación, la cual se considera una reparación mayor. Por otra parte, las reparaciones implican un levantamiento total o parcial del tanque, que debe ser realizado por personal con experiencia en estos aspectos, debido a que un trabajo de re-nivelación realizado inadecuadamente, puede resultar en un tanque con peores condiciones que la inicialmente evaluada.

Por lo anterior, cuando se está ante resultados de verticalidad, redondez o asentamientos por fuera de los valores permisibles, se recomienda que se realicen los siguientes pasos:

- Corrobore que está utilizando información confiable (niveles leídos).
- Consulte la historia de desempeño del tanque.
- En tanques con techo flotante o membrana interna flotante, haga una evaluación de verticalidad y redondez para determinar el efecto de estos asentamientos y descarte o confirme la afectación en el desempeño de los sellos.
- Realice evaluaciones más rigurosas, como por ejemplo modelos de análisis por elementos finitos.
- En caso dado que los análisis realizados anteriormente, muestre que hay zonas con asentamientos mayores a los permisibles, evalúe una de las siguientes opciones:

- Restringir el nivel de llenado del tanque (en caso de estudios de tanques en servicio o que se pongan en servicio sin corregir los asentamientos).
- Realizar una re-nivelación parcial o total del casco del tanque.
- En casos donde las evaluaciones mencionadas anteriormente, se obtengan datos de un desempeño de los sellos, se debe evaluar alternativas para:
 - Corregir la redondez del casco.
 - Especificar el sello para que se ajuste a las zonas críticas de falta de redondez.

BIBLIOGRAFÍA

- American Petroleum Company. (2012). *API 650 Welded tanks for oil storage* . Washington D.C.: Energy API.
- American Petroleum Institute. (2012). *API 653 Tanks inspection, repair, alteration an reconstruction*. Washington D.C., US: Energy API.
- American Petroleum Institute. (2014). *Energy API*. (E. API, Editor) Obtenido de <http://www.api.org/globalitems/globalheaderpages/about-api>
- ECOPETROL S.A. (2008). *Matriz de valoración de riesgos RAM*. Barrancabermeja: Empresa Colombiana de Petroleos.
- Ecopetrol S.A. (2014). *Guia técnica para estudio de asentamientos de cascos de tanques de almacenamiento*. Cartagena : Ecopetrol S.A.
- Ecopetrol S.A. (2014). *Guía técnica para evaluaciones de verticalidad y redondez en cuerpos de tanques de almacenamiento atmosféricos*. Cartagena: Ecopetrol S.A.
- ECOPETROL S.A. (2015). *Lo que hacemos información*. Recuperado el 2015, de Sección contratistas: <http://www.ecopetrol.com.co>
- Institute, American Petroleum. (2012). *Welded tanks for oil storage*. (API, Ed.) Washington, D.C.: Energy APY. Obtenido de Energy API.
- Rodríguez, J. C. (1980). *Procedimiento general para la fabricación y montaje de tanques de almacenamiento*. México D.F., México: Tampico, Tamps.