



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

VICERRECTORADO ACADÉMICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

Postgrado en Ingeniería Estructural

Proyecto de Trabajo Especial de Grado

**FIABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS DE TANQUES DE
ALMACENAMIENTO, PATIO TANQUE EL TEJERO DE PDVSA**

Presentado por.

Reinaldo Hernández

para optar por el título de

Especialista en Ingeniería Estructural

Asesor:

Prof. **Julio Manzanares**

Caracas, Junio 2018

Universidad Católica Andrés Bello
Dirección General de Estudios de Postgrado
Postgrado en Ingeniería Estructural
Presente.-

APROBACIÓN DEL ASESOR DEL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

En mi carácter de Asesor del trabajo especial de grado presentado por el ciudadano Reinaldo Hernández, cédula de identidad N° 15.619.098, titulado: CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO, PATIO TANQUE EL TEJERO DE PDVSA, para optar al Grado de Especialista en Ingeniería estructural, considero que dicho Trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometida a la presentación y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Caracas a los 05 días del mes de junio de 2018



Dr. Julio Manzanares
C.I. 7.085.243

DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de grado a mi amado hijo Saúl Isaac, por ser mi fuente de inspiración y motivo de lucha permanente, esperando con humildad, que este logro les sirva de ejemplo al transitar en su formación académica.

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a Dios Todopoderoso por facilitarme, con la existencia, la posibilidad de disfrutar de este valioso aprendizaje. Por ello, en Cristo me fortalezco.

Al Dr. Julio Manzanares, por su tiempo y dedicación para poder llevar a feliz término este trabajo de investigación.

A Lily Chang, mi dulce esposa, por su paciencia, abnegado y constante apoyo, pilar que apalanca mi éxito personal y profesional.

A mis Padres, quienes con sacrificio y tesón, garantizaron mi desarrollo intelectual, moral y humano.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
INTRODUCCIÓN	9
CAPITULO I. EL PROBLEMA	12
1.1. Planteamiento del Problema	12
1.2. Formulación del Problema.....	14
1.3. Sistematización del Problema	14
1.4. Objetivos.....	15
1.4.1. Objetivo General	15
1.4.2. Objetivos Específicos	15
1.5. Justificación de la Investigación	15
1.6. Alcance y Limitaciones de la Investigación	16
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes.....	17
2.2. Fundamentos Teóricos.....	19
2.2.1. Amenaza sísmica	19
2.2.2. Modelaje de la acción sísmica	25
2.2.3. Modelaje o idealización de tanques de almacenamiento	29
2.2.4. Definición de la vulnerabilidad sísmica	35
2.2.5. Métodos de análisis de la vulnerabilidad sísmica	36
2.2.6. Métodos de cuantificación de la vulnerabilidad sísmica.....	41
2.2.7. Índices de vulnerabilidad	41
2.2.8. Caracterización de variables aleatorias y estados límites.....	42
2.2.9. Métodos de comprobación de la seguridad	43
2.2.10. Índice de fiabilidad de Cornell, β	45
2.2.11. Métodos de simulación	49
2.2.12. Métodos de Monte Carlo (MMC).....	50
2.2.13. Funciones de falla.....	50

2.3. Marco Organizacional.....	51
2.4. Bases éticas y legales	51
2.5. Glosario de términos	51
CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO.....	58
3.1. Tipo de Investigación.....	58
3.2. Diseño de la Investigación.....	58
3.3. Unidad de Análisis.....	59
3.4. Técnicas de Recopilación de Datos	60
3.5. Procedimiento de investigación.....	61
CAPITULO IV. DESARROLLO DE OBJETIVOS	64
4.1. Tipos tanques de almacenamiento existentes en el PTT y su diseño estructural.	64
4.2. Condiciones actuales de los tanques mediante la medición de los espesores de paredes, placa anular y su sistema de anclajes, condiciones de operación y cualquier evento sobrellevado por los tanques (fuego, explosiones, asentamientos, entre otros).	73
4.3. Tipos de fallas estructurales típicas que se pueden presentar en los tanques de almacenamiento, derivados de eventos sísmicos pasados.	87
4.4. Determinación la fiabilidad estructural ante acciones sísmicas del lugar, de los tanques de almacenamiento de crudo, aplicando el método de Monte Carlo (MMC).....	88
4.4.1. Estimación de la amenaza sísmica y consecuencias en términos de pérdidas de vidas humanas, impacto al ambiente y consecuencias económicas (directas o indirectas) en el sitio.....	88
4.4.2. Modelaje la acción sísmica a través de espectros esperados en el sitio de respuesta.....	90
4.4.3. Funciones de falla	91
4.4.4. Variables aleatorias consideradas	92
4.4.5. Simulaciones matemáticas a través del Método de Nivel II, del Método de Monte Carlo (MMC).....	96
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
5.1. Conclusiones	100
5.2. Recomendaciones.....	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
Anexo A Datos de tanques del PTT	107
Anexo B Resultados de las simulaciones para el MMC.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MODELOS DE ATENUACIÓN	21
TABLA 2. ESCALA DE CLASIFICACIÓN DE RIESGOS Y PROBABILIDADES ANUALES DE EXCEDENCIA DE LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO, P_1	25
TABLA 3. PARÁMETROS DEL SUELO QUE DEFINEN LA FORMA ESPECTRAL	28
TABLA 4. COEFICIENTES DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTES, Ξ	29
TABLA 5. GEOMETRÍA Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LOS TANQUES ANALIZADOS	66
TABLA 6. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 9751	74
TABLA 7. INSPECCIÓN VISUAL: TANQUE 9752	75
TABLA 8. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 9754	76
TABLA 9. INSPECCIÓN VISUAL: TANQUE 9755	77
TABLA 10. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 9756	78
TABLA 11. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 130001	79
TABLA 12. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 130002	80
TABLA 13. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 200001	81
TABLA 14. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 200002	82
TABLA 15. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 200003	83
TABLA 16. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 250001	84
TABLA 17. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 250002	85
TABLA 18. INSPECCIÓN VISUAL TANQUE 250003	86
TABLA 19. ESTADOS DE DAÑOS POR SISMOS EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO	87
TABLA 20. DATA DE LA AMENAZA SÍSMICA DEL LUGAR DE ESTUDIO.	89
TABLA 21. VALORES MEDIOS Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS VARIABLES BÁSICAS (VB)	94
TABLA 22. RESULTADOS DE PROBABILIDAD DE FALLA Y FIABILIDAD APLICANDO EL MMC	97
TABLA 23. NIVELES DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO	98

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE CONTORNO DEL VALOR SÍSMICO CARACTERÍSTICO A^*	22
FIGURA 2. MAPA DE CONTORNO DEL VALOR SÍSMICO CARACTERÍSTICO γ	22
FIGURA 3. FORMA GENERAL DEL ESPECTRO DE DISEÑO	27
FIGURA 4. MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMACIÓN DE FUERZAS EN LA BASE DEL TANQUE.	30
FIGURA 5. REGIONES DE FALLA Y SEGURIDAD	43
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÍNDICE DE FIABILIDAD DE CORNELL, B	46
FIGURA 8. VISTA GENERAL DEL TANQUE 9751.	67
FIGURA 9. VISTA GENERAL DEL TANQUE 9752.	67
FIGURA 10. VISTA GENERAL DEL TANQUE 9754.	68
FIGURA 11. VISTA GENERAL DEL TANQUE 9755.	68
FIGURA 12. VISTA GENERAL DEL TANQUE 9756.	69
FIGURA 13. VISTA GENERAL DEL TANQUE 130001.	69
FIGURA 14. VISTA GENERAL DEL TANQUE 130002.	70
FIGURA 15. VISTA GENERAL DEL TANQUE 200001.	70
FIGURA 16. VISTA GENERAL DEL TANQUE 200002.	71
FIGURA 17. VISTA GENERAL DEL TANQUE 200003.	71
FIGURA 18. VISTA GENERAL DEL TANQUE 250001.	72
FIGURA 19. VISTA GENERAL DEL TANQUE 250002.	72
FIGURA 20. VISTA GENERAL DEL TANQUE 250003.	73
FIGURA 21. ESPECTROS DE DISEÑO PARA TANQUES NO ANCLADOS.	91
FIGURA 22. ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICA MEDIO $\pm$ DESVIACIÓN ESTÁNDAR – EFECTOS IMPULSIVOS (DIRECCIÓN HORIZONTAL). TANQUES NO ANCLADOS.	95
FIGURA 23. ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICA MEDIO $\pm$ DESVIACIÓN ESTÁNDAR – EFECTOS IMPULSIVOS (DIRECCIÓN VERTICAL). TANQUES NO ANCLADOS.	95
FIGURA 24. ESPECTROS DE RESPUESTA ELÁSTICA MEDIO $\pm$ DESVIACIÓN ESTÁNDAR – EFECTOS CONVECTIVOS. TANQUES NO ANCLADOS.	96



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

VICERRECTORADO ACADÉMICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

Postgrado en Ingeniería Estructural

FIABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO, PATIO TANQUE EL TEJERO DE PDVSA

Autor: Hernández A., Reinaldo J.

Asesor: Manzanares V., Julio N.

Fecha: enero de 2018

RESUMEN

El sismo de Costa Rica del 22/04/1991, de magnitud M_s de 7,4; produjo daños en 15 tanques de almacenamiento de crudo de la Refinería Recope, puso en evidencia la vulnerabilidad de estos equipos. Venezuela posee una sismicidad de mediana a alta, las principales instalaciones industriales son obsoletas y diseñadas con códigos de diseño superados, se ubican en la zona de mayor amenaza sísmica. Además, los tanques son estructuras vulnerables por su bajo espesor de pared y las grandes fuerzas inerciales que induciría un sismo y su afectación al ser humano, ambiente y economía de la nación. El objetivo general de la investigación es evaluar la fiabilidad estructural actual ante acciones sísmicas de los tanques de almacenamiento de crudo en el patio de tanque el Tejero, Edo. Monagas de PDVSA. Se enmarca esta investigación en un nivel explicativo. En los tanques analizados se realizará la medición de espesores de láminas de pared, fondo y techo, cuyos resultados son insumos en conjunto con el historial de mantenimiento y operación, a fin de descartar eventos pasados que haya dado lugar a daños, cambios de material, geometría. Para la estimación de las acciones sísmicas y comparación de la demanda y la capacidad, se aplicarán las normas técnicas PDVSA JA-221 y FJ-251. Se aplicará como método de simulación el Método de Monte Carlo (MMC), un método de Nivel II. El estudio de fiabilidad estructural de tanque de esta instalación ante acciones sísmicas permite proponer medidas para mejorar la capacidad de respuesta de la estructura, implementando mejoras estructurales que minimicen posibles fallas y ayuden a evitar pérdidas económicas y ambientales ante la ocurrencia de futuros eventos sísmicos.

Palabras Clave: fiabilidad estructural, tanques de almacenamiento, amenaza sísmica, evaluación sismorresistente.

Línea de Trabajo: Riesgo sísmico e Ingeniería estructural

INTRODUCCIÓN

La seguridad de un sistema estructural se provee aportando capacidad a los elementos estructurales para satisfacer la demanda a la cual estarán sometidos. Sin embargo, el sistema estructural eventualmente estará expuesto a condiciones de cargas excepcionales y naturales, como el sismo. Al término de estos eventos, el sistema estructural sufre cierto deterioro en sus propiedades mecánicas dando lugar a que se reduzca su capacidad estructural y al mismo tiempo se incremente la demanda estructural ante cierto nivel de sollicitación en algunos elementos del sistema resistente a sismos. Como resultado de lo anterior, la fiabilidad del sistema estructural se reduce, llegando hasta el punto en el que dicho sistema presente niveles de fiabilidad, probabilísticamente no tolerables. De allí la necesidad de desarrollar criterios que permitan evaluar la fiabilidad estructural durante su vida útil y ante diferentes tipos de cargas.

La Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) (2012), señala que aproximadamente un 80% de la población venezolana vive sobre la zona de mayor actividad sísmica del país. Sobre esta franja o cinturón sísmico se concentra buena parte del parque industrial y en particular el de la industria petrolera, ubicándose en esta zona instalaciones vitales tales como refinerías, puertos de despacho de productos, plantas de distribución de gasolinas, oleoductos, gasoductos, sólo por nombrar algunas de las más importantes, lo que incrementa notablemente el riesgo sísmico. Esto último se conoce como riesgo tecnológico o riesgo construido.

Siendo la economía venezolana esencialmente dependiente de la renta petrolera, la incidencia de un sismo de mediana a alta intensidad sobre las instalaciones industriales de Petróleos de Venezuela, S. A. (PDVSA), podrían tener dimensiones catastróficas que afectarían el desarrollo del país de manera significativa.

El marco tectónico de Venezuela, la vulnerabilidad y la obsolescencia estructural del parque industrial venezolano y en particular el de la industria petrolera, el impacto humano, social y económico, debido a un comportamiento no adecuado de tanques de almacenamiento metálicos, cilíndricos y no anclados, en caso de ocurrencia de sismos de intensidad mediana a alta, eventos de probabilidad de ocurrencia importante, pone de manifiesto la importancia de contar con un método de evaluación que permitan establecer su fiabilidad estructural y definir medidas de mitigación para llevar el riesgo sísmico a niveles tolerables, de acuerdo a los códigos de diseño y literatura especializada en el tema de fiabilidad estructural.

Las nuevas tendencias en el diseño sismorresistente de instalaciones industriales, reconocen la necesidad de evaluar la seguridad de estructuras esenciales ante la ocurrencia de eventos sísmicos, incorporando conceptos probabilísticos para el tratamiento racional de las incertidumbres asociadas a las dimensiones de los elementos estructurales, cargas ambientales, propiedades de los materiales, cargas externas, entre otros, reconociendo así el carácter no determinístico o probabilístico de estas variables y su caracterización a través de modelos estadísticos apropiados. El problema entonces puede plantearse en términos de la relación entre la “demanda” y la “resistencia”.

La evaluación persigue generar un herramienta con fundamento probabilístico, para la toma de decisiones de carácter técnico- económico, con base en análisis de riesgo-costo-beneficio, partiendo de una adecuada caracterización y modelaje de la amenaza sísmica, la estimación de las consecuencias humanas, económicas y ambientales en caso de falla estructural, la determinación de las variables básicas, deterministas y no deterministas, que gobiernan el problema de la demanda-resistencia y su caracterización probabilística, la construcción de un modelo matemático para estimación de fuerzas sísmicas y esfuerzos actuantes en la base del tanque y la adaptación de métodos de simulación de Nivel II, como el de Monte Carlo para obtener la probabilidades de falla y de fiabilidad estructural de tanques de almacenamiento ante acciones sísmicas.

El presente trabajo se estructura en los siguientes capítulos:

Capítulo I. El Problema: Comprende el planteamiento del problema, las interrogantes de la investigación, los objetivos de la investigación, la justificación que avala la realización de este proyecto, la justificación, el alcance y las limitaciones presentadas para el desarrollo del mismo.

Capítulo II. Revisión Bibliográfica: Conformado por los antecedentes de la investigación, las bases teóricas y legales, así como el marco organizacional que sustentan el presente trabajo de final.

Capítulo III. Metodología: Compuesto por el tipo de estudio planteado en este trabajo, la metodología para la detección de necesidades y para el desarrollo de la propuesta, así como el cronograma de actividades del proyecto.

Capítulo IV. Desarrollo de Objetivos: Este capítulo está conformado por el desarrollo y análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos establecidos en este Trabajo Final.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones: Presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas del desarrollo del presente estudio.

Por último se encuentran las referencias bibliográficas y los anexos.

CAPITULO I. EL PROBLEMA

El siguiente Capítulo presenta de manera clara, concreta y concisa el Planteamiento del Problema, seguido del Objetivo General y los Objetivos Específicos; explicando a su vez la Justificación del Problema, su Alcance y su Limitación.

1.1. Planteamiento del Problema

Los eventos sísmicos son de ocurrencia aleatoria y son difíciles de predecir, así como tampoco los niveles de severidad: intensidad, magnitud y aceleraciones que éste podría generar, ni los daños que produciría en las estructuras. Asociado a ello están la resistencia de los materiales empleados y la calidad de la construcción, de tal modo que la respuesta de una estructura ante un evento sísmico requiere de un riguroso método científico que tome en cuenta el carácter probabilístico de las variables involucradas en el proceso de diseño y respuesta de estructuras ante acciones sísmicas.

La mayor parte del parque industrial en Venezuela se encuentra ubicado en las zonas de mayor amenaza sísmica y sismicidad del país. En general, una instalación industrial típica la conforman equipos o estructuras de diferente tipología, que van desde recipientes verticales y horizontales, hornos de calentamiento, esferas de almacenamiento, intercambiadores de calor, puentes de tuberías, reactores y tanques metálicos cilíndricos para almacenamiento, siendo estos últimos vitales para los procesos químicos y comerciales por cuanto están destinados al almacenamiento de materia prima y de los productos refinados, previo a su despacho o venta.

En particular una tipología estructural de interés son los tanques de almacenamiento, ampliamente usados en instalaciones industriales. Los daños en tanques de almacenamiento como consecuencia de sismos pasados, revelan la vulnerabilidad estructural de estos equipos. Desde el punto de vista del diseño los

tanques son estructuras con grandes dimensiones, espesor de pared limitado a unos pocos milímetros, que almacenan grandes volúmenes de productos inflamables y/o tóxicos, que en presencia de movimientos vibratorios del terreno, experimentan grandes fuerzas inerciales producto de la aceleración de estas masas. Por otro lado el movimiento del contenido almacenado en un tanque obedece a complejas leyes hidrodinámicas.

La vulnerabilidad estructural de los tanques de almacenamiento, se ve potenciada por la edad del parque industrial venezolano. En el caso particular de PDVSA, las principales instalaciones cuentan con más de medio siglo de operación y fueron diseñadas y construidas siguiendo códigos o normas extranjeras vigentes para la época, pero que no consideraban correctamente la amenaza sísmica en Venezuela, no suficientemente estudiada en aquel momento.

Las nuevas tendencias en el diseño sismorresistente de instalaciones industriales, reconocen la necesidad de evaluar la seguridad de estructuras esenciales ante la ocurrencia de eventos sísmicos, incorporando conceptos probabilísticos para el tratamiento racional de las incertidumbres asociadas a las dimensiones de los elementos estructurales, cargas ambientales, propiedades de los materiales, cargas externas, etc., reconociendo así el carácter no determinístico o probabilístico de estas variables y su caracterización a través de modelos estadísticos apropiados.

Por tanto la evaluación para la determinación de la fiabilidad estructural o la respuesta ante acciones de tipo sísmico de tanques metálicos cilíndricos, requiere de un tratamiento probabilístico de “la demanda” a la cual se vería sometida y “la resistencia” a un determinado tipo de esfuerzo o sollicitación.

El problema entonces puede plantearse en términos de la amenaza sísmica por ser Venezuela un país con una sismicidad catalogada de mediana a alta, las principales instalaciones industriales son obsoletas, se ubican en las zonas de mayor amenaza sísmica del país, diseñadas y construidas con códigos de diseño ya superados y que no se correspondían con la sismicidad propia del país. Si adicionalmente se considera que los tanques son estructuras muy vulnerables por su bajo espesor de pared y las grandes fuerzas inerciales que induciría el

movimiento vibratorio de un sismo y su afectación al ser humano, ambiente y economía de la nación en caso de tener un comportamiento sismorresistente no adecuado. Si además se considera el carácter aleatorio de las variables que gobiernan el problema de la “demanda” y la “resistencia”, tales como la calidad de los materiales constructivos, las condiciones de operación y la imposibilidad de predecir el día, lugar, duración, magnitud, niveles de aceleración de un sismo, se está en presencia de un problema que requiere una evaluación orientada a la optimización de los recursos materiales, humanos y económicos.

El objeto de estudio de esta investigación se enmarca dentro del contexto tectónico y sismicidad de Venezuela, leyes y normas técnicas industriales venezolanas que rigen el diseño sismorresistente de tanques de almacenamiento, las incertidumbres intrínsecas al diseño ingenieril en la estimación de las cargas y calidad de materiales y con base en la experiencia del comportamiento de estos equipos en sismos pasados en otros países, de sismicidad, riesgo e instalaciones industriales similares a las de Venezuela.

1.2. Formulación del Problema

Por lo expuesto anteriormente, surge la siguiente interrogante a responder en la presente investigación: ¿Qué fiabilidad estructural se puede obtener actualmente, según la evaluación estructural ante acciones sísmicas, orientadas a optimizar los recursos materiales, humanos y económicos, a partir del tratamiento probabilístico de las variables determinantes, de carácter natural, constructivo y operacional de tanques de almacenamiento de crudo del patio de tanque Tejero. Edo. Monagas de PDVSA Exploración y Producción?

1.3. Sistematización del Problema

¿Qué tipo de tanques de almacenamiento existen en el patio de tanque Tejero, Edo. Monagas de PDVSA Exploración y Producción?

¿En qué condiciones estructurales y de operación se encuentran actualmente los tanques de almacenamiento?

¿Cuáles son los tipos de fallas estructurales que se pueden presentar en los tanques de almacenamiento, derivados de eventos sísmicos?

¿Cuál es la fiabilidad estructural ante acciones sísmicas, de los tanques de almacenamiento de crudo, aplicando el método de Monte Carlo?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la fiabilidad estructural actual ante acciones sísmicas de los tanques de almacenamientos de crudo, cilíndricos, verticales, metálicos y no anclados en el Patio de Tanque el Tejero (PTT), Edo. Monagas de PDVSA Exploración y Producción.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Describir los tipos tanques de almacenamiento existentes en el PTT y su diseño estructural.
2. Determinar las condiciones actuales de los tanques mediante la medición de los espesores de techo, paredes, placa anular y su sistema de anclajes, condiciones de operación y cualquier evento sobrellevado por los tanques (fuego, explosiones, asentamientos, entre otros).
3. Identificar los tipos de fallas estructurales típicas que se pueden presentar en los tanques de almacenamiento, derivados de eventos sísmicos pasados.
4. Determinar la fiabilidad estructural ante acciones sísmicas del lugar, de los tanques de almacenamiento de crudo, aplicando el método de Monte Carlo (MMC).

1.5. Justificación de la Investigación

En zonas de alta sismicidad, la ocurrencia de daños graves en una instalación industrial debido a sismos intensos puede ser del mismo orden que la probabilidad de ocurrencia de accidentes severos debido sólo a las características y riesgos propios de las operaciones. Es por ello que la caracterización de situaciones de riesgo por efecto de sismos y la ejecución de las medidas de prevención y mitigación, requieren el mismo nivel de atención que los riesgos operacionales.

De acuerdo con los mapas de peligro sísmico de la Norma Técnica PDVSA JA-

221, el PTT, se encuentra ubicada en una zona de elevada amenaza sísmica, donde la ocurrencia de un evento sísmico podría dar lugar a graves consecuencias humanas, ambientales y económicas, de allí la necesidad de evaluar la fiabilidad estructural de estos equipos ante este tipo de acciones.

Es imposible predecir el lugar, fecha y hora de ocurrencia de un evento sísmico, los niveles de severidad que éste podría generar, ni los daños que produciría en las estructuras. En vista de la gran cantidad de incertidumbres que se pueden generar, se hace necesario conocer la respuesta del sistema comprendida entre unos márgenes, establecidos en códigos de diseño y literatura especializada en el tema de fiabilidad estructural. Esta es la base para definir el estudio basado en el concepto de fiabilidad, el cual está referido a la probabilidad de que la respuesta de un sistema satisfaga una serie de estados límites.

Existen diversas razones que limitan los recursos financieros disponibles para mantenimiento, reparaciones y adecuación estructural de instalaciones industriales, por lo cual se debe optimizar las inversiones racionalmente, jerarquizando los niveles de fiabilidad estructural, riesgos y los potenciales daños en tanques de almacenamiento debidos a la ocurrencia de sismos. Los tanques de almacenamiento son vitales dentro de una instalación industrial, por el importante servicio que prestan para el almacenamiento de materias primas para su despacho y comercialización en el mercado. De allí la importancia de contar con herramientas que permitan diagnosticar y extender su vida útil, además de garantizar la continuidad operacional.

1.6. Alcance y Limitaciones de la Investigación

La presente investigación se limita a evaluar los tanques metálicos cilíndricos de almacenamiento de Crudo, ubicados en el PTT, Edo. Monagas, a partir de la información de medición de espesores en paredes y placa anular, suministrada por la Gerencia Técnica de Mantenimiento de equipos estáticos, del estimado de la amenaza sísmica del lugar, propiedades geotécnicas del terreno, condiciones de operación, de anclajes y grado de riesgo, utilizando el método de Monte Carlo.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

El presente Capítulo contiene la información correspondiente al Marco Teórico, dentro del cual se desarrolla la teoría que fundamenta la presente investigación. Para ello se inicia con la descripción de los Antecedentes, seguido de los Fundamentos Teóricos y del Marco Organizacional.

2.1. Antecedentes

Torres (2004) desarrolló la tesis doctoral “Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de Puentes de Hormigón Armado”, que tuvo como objetivo el desarrollo e implementación de metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes de hormigón armado, considerando la información sísmica y estructural disponible, las incertidumbres asociadas a estos parámetros y los avances logrados en los procesos de cálculo, modelación y simulación del comportamiento sísmico de estructuras. Desde esta visión se revisaron los principales conceptos asociados a la vulnerabilidad sísmica de puentes de hormigón armado y crear una plataforma coherente que permita racionalizar los criterios de evaluación estructural.

Entre las conclusiones señaladas en la precitada tesis, están las que destacan lo fundamental de la correcta selección del tipo de comportamiento estructural en los procedimientos basados en el cálculo estático no lineal, sobre todo en aquellos estados de daño donde la estructura presenta degradación en casos de estado de daño mayor. El Método de Monte Carlo (MMC), presenta resultados satisfactorios y confiables pero deben ser adaptados para ser aplicados con espectros de respuesta suavizados. Los resultados obtenidos son sensibles a las características y leyes de comportamiento de los materiales, la geometría de las estructuras, la discretización de las masas o pesos y el modelo estructural adoptado.

Alarcón (2004) desarrolló la tesis “Evaluación de la Fiabilidad en Sostenimiento de Túneles y Galerías”, con el objetivo de evaluar la fiabilidad en sostenimiento de

túneles y galerías considerando los métodos de diseño empíricos y de convergencia de confinamiento para la perforación y sostenimiento en la construcción de túneles: Métodos de Bernold, Bernold modificado, austriaco, belga y alemán. Desde esta óptica se revisaron los principales conceptos asociados a la vulnerabilidad sísmica de túneles y galerías, tomando en consideración los diferentes métodos de diseño y técnicas constructivas y la interacción entre el suelo y la estructura.

Las conclusiones de este estudio derivadas del estudio profundo de los métodos para el cálculo de la fiabilidad empleados y comprobar que métodos habitualmente empleados en problemas relacionados con Mecánica de Suelos y Rocas como el Método de Estimaciones Puntuales (MEP), producen resultados incongruentes en comparación con simulaciones más precisas basadas en el MMC. El MEP produce errores que dependen de los estados límites y de las características de las distribuciones estadísticas de un 45%.

El estudio anteriormente referido se vincula con esta investigación por tener como centro los métodos de fiabilidad de Nivel II. Los cuales han demostrado que producen resultados muy confiables y de calidad a través de la determinación del índice de fiabilidad de Cornell, β .

Las investigaciones citadas indican la viabilidad de emplear métodos de fiabilidad de Nivel II para determinar la probabilidad de falla o fiabilidad de sistemas estructurales, tales como el MEP y el MMC, validando eso sí, la “calidad” matemática del resultado y su porcentaje de error.

Bojórquez (2009) en su tesis “Diseño sísmico de estructuras de acero basado en fiabilidad estructural y conceptos de energía”, propone un procedimiento que considera de manera explícita tanto las demandas máximas como las demandas por deformación plástica acumuladas inducidas por sismos de larga duración en estructuras sismorresistentes. El criterio de diseño se basa en suministrarle a las estructuras una capacidad para controlar las demandas máximas de ductilidad global, distorsión de entrepiso y de energía histerética disipada, mediante el uso de a) espectros de ductilidad y espectros de energía histerética normalizada con

tasas anuales de falla uniforme; y b) factores de transformación que toman en cuenta las diferencias entre las respuestas de sistemas de un grado y múltiples.

Entre las conclusiones de este estudio destacan que las deformaciones plásticas tienen importancia significativa para estructuras con elementos de baja capacidad de rotación plástica acumulada sujetas a movimientos sísmicos de larga duración.

Bermúdez (2010), en su tesis “Vulnerabilidad sísmica de edificios de acero”, trata aspectos relativos a los métodos dinámicos en un edificio prototipo de acero. Como resultado se expresan los umbrales de los estados de daño en función de los puntos característicos del espectro de capacidad bilineal. Se realiza una evaluación estocástica detallada que considera la variabilidad probabilística de la acción sísmica, de las cargas gravitatorias y de las propiedades físicas y mecánicas de los miembros estructurales. Esto permitió establecer los principales estados límites y de los umbrales de los distintos estados de daño. Como resultado se identifican los estados límite que con más probabilidad serán alcanzados.

2.2. Fundamentos Teóricos

2.2.1. Amenaza sísmica

La amenaza sísmica se define como la condición latente derivada de la posible ocurrencia de un sismo de cierta magnitud, distancia y profundidad, que puede causar daño a la población y sus bienes, la infraestructura, el ambiente y la economía pública y privada (FOPAE, 2010). Para conocer la posible intensidad de la amenaza (energía en el sitio de estudio) es necesario estudiar a nivel regional las fuentes o fallas sísmicas para determinar el potencial de generar sismos fuertes, y a nivel local la respuesta sísmica (amplificación) de los suelos y rocas ante las ondas sísmicas.

De acuerdo a la página web de FUNVISIS, (FUNVISIS, 2014)., la amenaza sísmica puede calcularse a nivel regional y a nivel local, para lo cual se deben considerar los parámetros de fuentes sismogénicas, así como también los registros de eventos sísmicos ocurridos en cada zona fuente y la atenuación del movimiento del terreno. La metodología para su determinación se inicia con el

establecimiento de la ley de recurrencia sísmica, es decir la distribución del número de eventos con diferentes magnitudes, ocurridos dentro de un área específica y en un tiempo determinado, normalmente expresada en función de la relación frecuencia-magnitud.

Gutenberg y Richter (1954) expresan esta función de la siguiente manera:

$$\text{Log } N = a - bM \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde N representa la recurrencia sísmica anual de magnitud mayor o igual a M, y “a” y “b” son constantes determinadas para la región de interés. Estas constantes son calculadas con base en la aplicación de mínimos cuadrados y necesitan ser actualizadas frecuentemente, con base en información elaborada por organizaciones e institutos para tal fin.

Para realizar un estudio de recurrencia sísmica es importante contar con un catálogo sísmico actualizado, el cual consiste en la compilación de eventos sísmicos históricos e instrumentales registrados durante un período de tiempo determinado.

Es a partir de 1530 que en Venezuela se tiene evidencia histórica escrita sobre la ocurrencia de sismos (sismos históricos) y luego de 1910 cuando se inicia la sistematización de la información sobre movimientos telúricos registrada mediante los instrumentos para tal fin (sismos instrumentales), se realiza su registro en estaciones sismológicas (FUNVISIS, 2014).

Con base en la sismicidad y la tectónica regional, se definen las áreas fuentes o zonas fuentes, las cuales presentan uniformidad de los focos de los sismos registrados y se encuentran asociadas a un sistema de fallas activas.

Las leyes de atenuación se utilizan para estimar el nivel de movimiento del suelo en el sitio de interés ante la ocurrencia de un sismo con cierta magnitud. Para definir la ley de atenuación a utilizar en un estudio de amenaza, debe tomarse en cuenta la fuente o falla con mayor incertidumbre. De una manera general, una modelo de atenuación se representa según la Ecuación (2).

$$\text{Ln } (a) = K_1 + K_2 \cdot \text{Ln } (R+C) + K_3 \cdot M + K_4 \cdot H \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde K_1 , K_2 , K_3 y K_4 constantes a determinar, R representa la distancia epicentral expresada en kilómetros, M la magnitud del evento en ondas corpóreas, M_s , H la profundidad focal, expresada en kilómetros, I la Intensidad del evento y C el coeficiente del valor más representativo de las profundidades focales para los diferentes tipos de sismos en la región de estudio.

En el Tabla 1 a manera de ejemplo se muestran algunas leyes de atenuación utilizadas en estudios de riesgo sísmico en Venezuela. INTEVEP es centro de investigación y brazo tecnológico de PDVSA.

Tabla 1 Modelos de atenuación

Autor	Modelos de Atenuación
FUNVISIS Occidente y centro	$\ln(a) = 4,48 + 0,53M - 1,56\ln(R + 15)$
INTEVEP Occidente y centro	$\ln(a) = 5,40 + 0,36M - 0,861\ln(R + 15)$
FUNVISIS Oriente	$\ln(a) = 4,87 + 0,96M - 1,56\ln(R + 25)$
INTEVEP Oriente	$\ln(a) = 3,75 + 0,47M - 0,57\ln(R + 25)$

Fuente: <http://www.funvisis.gob.ve/amenaza.php>

La amenaza sísmica generalmente se representa mediante mapas con curvas de isoaceleración para diferentes períodos de retornos y mediante espectros de pseudovelocidad del suelo, mostrando su comportamiento en función de las fuentes sísmicas. Los resultados de estos estudios se utilizan en el diseño de obras civiles, puesto que permiten estimar las fuerzas probables a las que se someterá una estructura en un determinado lugar, en caso de un evento sísmico.

En PDVSA JA-221, norma orientada hacia el diseño sismorresistente de instalaciones industriales, se plantea el cálculo de la amenaza sísmica a través de los mapas de peligro sísmico que se muestran en las Figuras 1 y 2 y que son el resultado de la cuantificación probabilística de la amenaza sísmica fundamentada en la mejor información disponible para el año 1996. Es previsible que a medida que se amplíe la estadística sobre los movimientos fuertes del terreno debido a sismos locales, así como la comprensión de sus orígenes y la frecuencia de

ocurrencia de grandes sismos, será entonces necesario ajustar los valores y/o la forma de las curvas de las figuras mencionadas.

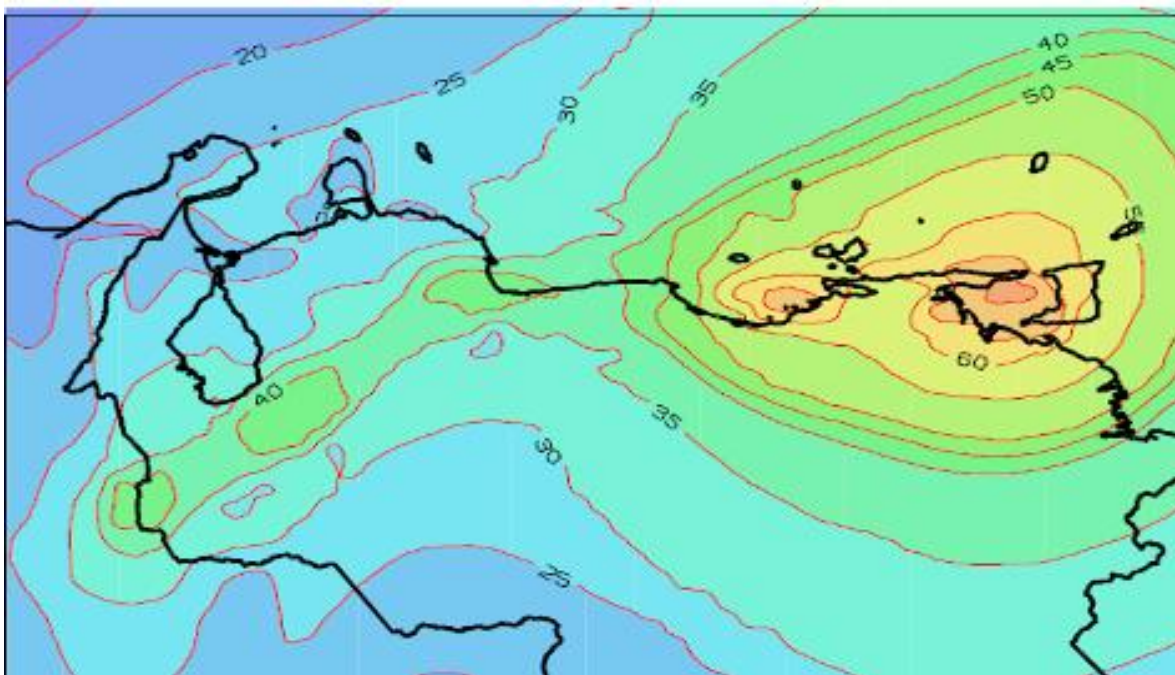


Figura 1. Mapa de contorno del valor sísmico característico a^* .

Fuente: PDVSA JA-221 (2014, p. 18)

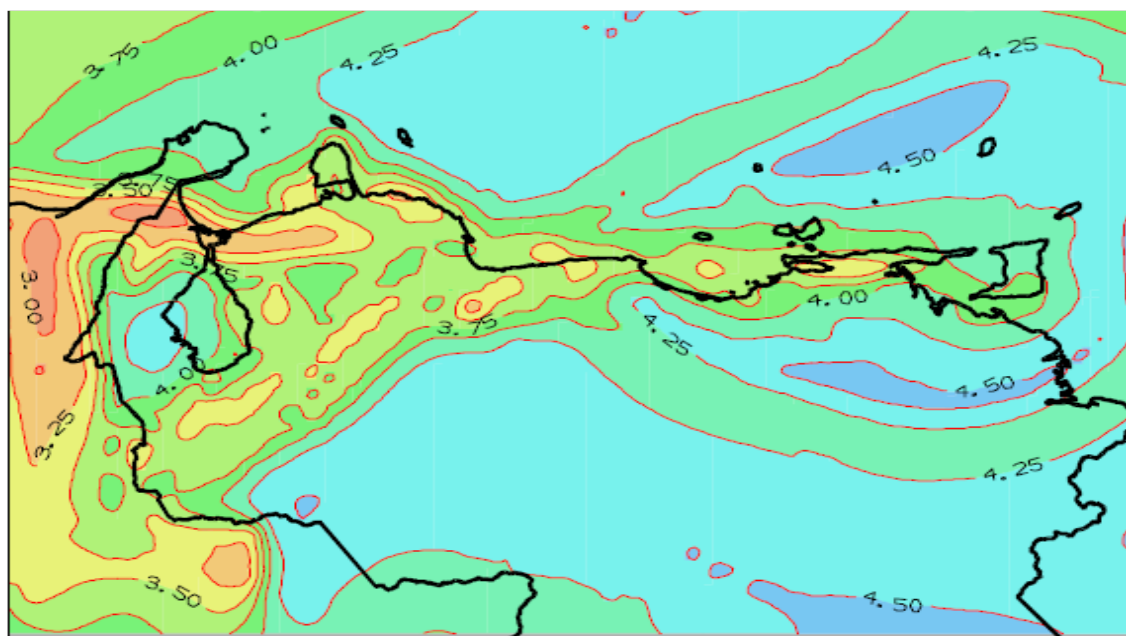


Figura 2. Mapa de contorno del valor sísmico característico γ

Fuente: PDVSA JA-221 (2014, p. 19)

El procedimiento para el cálculo de la amenaza sísmica, contenido en esta especificación difiere notablemente del procedimiento clásico utilizado comúnmente en diversas normas de diseño, en la que permite la incorporación de un número mayor de variables que condicionan el valor de la aceleración máxima del terreno en el sitio de interés. En la formulación clásica el usuario selecciona la aceleración de diseño a partir de un mapa de zonificación el cual está asociado a un período fijo de retorno del movimiento sísmico (lo cual equivale a fijar pares de valores (P^*, t) , siendo P^* la probabilidad de excedencia durante la vida útil t de la estructura). En la formulación de la PDVSA JA 221 (2014), la presencia de los dos mapas asociados a los parámetros a^* (aceleración característica del riesgo sísmico en cada localidad en cm/s^2) y γ (valor característico del riesgo sísmico en cada localidad), permite que la aceleración de diseño pueda ser determinada igual que en la formulación clásica o considerando diferentes valores de período de retorno y vida útil.

El análisis de los resultados del cálculo de la amenaza sísmica, en términos de la aceleración máxima del terreno, revela que en el rango de valores de interés hay una relación aproximadamente lineal entre el logaritmo de la tasa anual de excedencia λ y el logaritmo de la aceleración máxima del terreno a , expresado en la Ecuación (3).

$$\text{Ln}\lambda = q - \gamma \cdot \text{Lna} \quad (\text{Ec. 3})$$

q y γ son parámetros que caracterizan el peligro sísmico de la localidad en consideración. La Ecuación (3) puede reescribirse como la Ecuación (4).

$$\lambda = \left(\frac{a}{a^*} \right)^{-\gamma}, \text{ expresado en (1/año)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde se ha introducido la variable a^* dada por la Ecuación (5).

$$a^* = e^{q/\gamma}, \text{ expresado en (cm/s}^2\text{)} \quad (\text{Ec 5})$$

La aceleración horizontal máxima del terreno, a , en cm/s^2 , se obtiene a partir de la Ecuación (6).

$$a = a^* [-\ln (1-p_1)]^{-1/\gamma} \quad (\text{Ec } 6)$$

Donde p_1 es la probabilidad anual de excedencia dada en la tabla 2. Es igual al inverso del período de retorno.

La aceleración horizontal máxima del terreno, a , es comúnmente expresada como una fracción de la aceleración de gravedad, g , y se denota como A_0 y se calcula como se indica en la Ecuación (7).

$$A_0 = \frac{a}{g} \quad (\text{Ec } 7)$$

La aceleración vertical máxima del terreno, A_v , es referida comúnmente en códigos de diseño como 0,70 veces la aceleración horizontal máxima del terreno. Tal como se indica en la Ecuación (8).

$$A_v = 0,70 A_0 \quad (\text{Ec } 8)$$

El grado de riesgo permite establecer la probabilidad de excedencia anual, p_1 , de la aceleración horizontal máxima del terreno, “ a ” y se hace con base en las consecuencias de un evento causado por el mal funcionamiento, falla o colapso de la estructura o instalación. Estas consecuencias se expresan en función del número de personas expuestas, las pérdidas económicas directas, lucro cesante e impacto ambiental, la que resulte más severa. El grado de riesgo se clasifica como A, B, C o D, de menor a mayor a severidad, ver tabla 2.

Tabla 2. Escala de clasificación de riesgos y probabilidades anuales de excedencia de los movimientos del terreno, p_1

Grado de Riesgo	CONSECUENCIAS EN TÉRMINOS DE				p ₁ (10 ⁻³)
	Número de personas expuestas	Pérdidas económicas		Impacto Ambiental	
		Materiales	Lucro Cesante		
A	Pocas (< 10)	Limitado a la instalación	Despreciable	Poco o nulo	2
B	Importante (11 a 100)	La instalación y alguna vecina	Significativo. Entre 1 y 50 MMUS\$	Recuperación menor de 3 años	1
C	Elevado número de personas (100 a 500)	La instalación y numerosas vecinas	Entre 50 y 250 MMUS\$	Recuperación 3 a 10 años	0,5
D	> 500 personas	De naturaleza catastrófica	> 250 MMUS\$	Irreversible	0,1

Fuente: PDVSA JA-221 (2014, p. 15)

2.2.2. Modelaje de la acción sísmica

Actualmente, el concepto de espectro de respuesta es una importante herramienta de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sismorresistente. En forma general, podemos definir espectro como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. En estos gráficos, se representa en abscisas el periodo propio de la estructura (o la frecuencia) y en ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento.

La importancia de los espectros en el diseño de estructuras radica en el hecho de que estos gráficos condensan la compleja respuesta dinámica en un parámetro clave: los valores de respuesta máxima, que son usualmente los requeridos por el diseñador para el cálculo de estructuras. Se debe aclarar, sin embargo, que los espectros de respuesta omiten información importante dado que los efectos del terremoto sobre la estructura dependen no solo de la respuesta máxima sino

también de la duración del movimiento sísmico y del número de ciclos con demanda significativa de desplazamientos.

Como se mencionó anteriormente, el concepto de espectro ha ganado una amplia aceptación como herramienta de la dinámica estructural. Es por ello que se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con distintos objetivos:

Espectros de respuesta elástica: representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto.

Espectros de respuesta inelástica: son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico. Estos espectros representan la ductilidad requerida por un sismo dado en función del periodo de vibración de la estructura y se grafican usualmente para distintos niveles de resistencia. También, se construyen espectros de aceleración, desplazamiento, de cedencia o desplazamiento último de sistemas inelásticos, en donde se consideran distintos niveles de ductilidad.

Espectros de diseño: las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, descritos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sismorresistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistentes se realiza a partir de espectros que son

suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos; como el indicado por Echezuría (2011), publicado en la revista de ingeniería de la Universidad Andres Bello.

En la Figura 3, se muestra el espectro de diseño propuesto en la Norma técnica PDVSA JA-221, para los parámetros del suelo, amortiguamiento referido al crítico, amenaza sísmica para el sitio del interés y grado de riesgo asociado (probabilidad de excedencia anual).

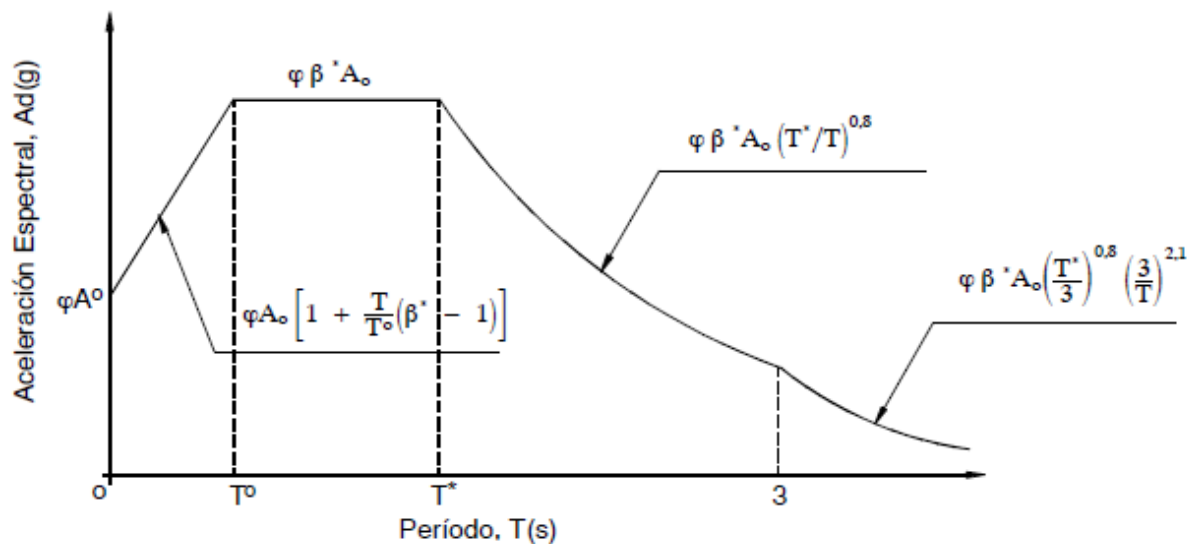


Figura 3. Forma general del espectro de diseño

Fuente: PDVSA JA-221 (2014, p. 21)

Es un hecho reconocido que las condiciones locales del subsuelo pueden modificar las características de los movimientos del terreno. Esto se ha comprobado en numerosos registros acelerográficos obtenidos en superficie y a diferentes profundidades de depósitos sedimentarios. Las formas espectrales difieren sensiblemente, con lo cual los efectos esperados son también distintos.

Resulta complejo incorporar la contribución de todos los factores que influyen en el movimiento del terreno en un sitio dado y se requiere un criterio cuidadoso para estimar sus efectos particulares. Entre los factores que afectan la frecuencia, la

amplitud y la duración del movimiento, se pueden mencionar los siguientes: la presencia y espesores de depósitos, la heterogeneidad entre los distintos estratos, las propiedades inelásticas de los suelos, la distancia de las fuentes sísmicas y la topografía del sitio de interés.

Los efectos inelásticos alcanzan influencias importantes bajo ciertas condiciones y pueden atenuar, en lugar de amplificar, los movimientos en la superficie respecto a los movimientos en el lecho rocoso. La influencia del suelo local en la forma espectral tipificada de la Figura 3, se considera independiente de la intensidad del movimiento y en consecuencia de la zona sísmica.

En la Tabla 2 de la Norma técnica PDVSA JA-221, se consideran cuatro formas espectrales tipificadas (S1 a S4) y el factor de corrección, ϕ , asociado. Cada forma espectral tiene asociada unos parámetros de β , T° y T^* , que definen la forma del espectro y están presentados en la Tabla 3 de la precitada especificación. Estos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del suelo que definen la forma espectral

Forma espectral	β	T° (s)	T^* (s)
S1	2,4	0,10	0,40
S2	2,6	0,20	0,80
S3	2,8	0,30	1,20
S4	3,0	0,40	1,60

Fuente: PDVSA JA-221 (2014, p. 21)

El factor de amplificación espectral, β^* , depende a su vez del factor de amortiguamiento, ζ , el cual incorpora las diversas formas de disipación de energía del sistema tanque-líquido-suelo y viene dado por la Ecuación (9).

$$\beta^* = \frac{\beta}{2,3} (0,0853 - 0,739 \ln \zeta) \quad (\text{Ec } 9)$$

Los valores del factor de amortiguamiento, ζ , están dados en la Norma Técnica PDVSA FJ-251 (2014) y se reproducen en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de amortiguamiento equivalentes, ξ

TIPO DE TANQUE	EFECTOS IMPULSIVOS				EFECTOS CONVECTIVOS
	Forma espectral S1 y S2		Forma espectral S3 y S4		
	Dirección Horizontal	Dirección Vertical	Dirección Horizontal	Dirección Vertical	
Anclado	0,03 ^(a)	0,05	0,05 ^(b)	0,08	0,005
No anclado	0,10	0,05	0,15	0,08	0,005

(a): Se puede elevar hasta 0,05 si los anclajes se diseñan como anclajes dúctiles que trabajen en el rango inelástico.

(b): Se puede elevar hasta 0,07 si los anclajes se diseñan como anclajes dúctiles que trabajen en el rango inelástico.

Fuente: PDVSA JA-221 (2014, p. 15)

Los efectos del sismo sobre el líquido contenido en un tanque, pueden diferenciarse en impulsivos y convectivos. Los efectos impulsivos son aquellos efectos dinámicos asociables al movimiento del líquido como un cuerpo rígido, mientras que los efectos convectivos son aquellos efectos dinámicos coligados a las oscilaciones del líquido.

2.2.3. Modelaje o idealización de tanques de almacenamiento

Housner (1954) y PDVSA FJ-251 (2014), propone un completo modelo matemático que considera la geometría, pesos y alturas efectivas, efectos hidrodinámicos, fuerzas actuantes en la base del tanque y esfuerzos actuantes y admisibles en las paredes del tanque cilíndrico, no anclado y sometido a presión atmosférica.

Este modelo considera para la determinación de las fuerzas resultantes en la base de un tanque, la contribución de los efectos hidrodinámicos producidos por la componente sísmica horizontal. El peso debido a los efectos impulsivos representa la fracción del peso que responde solidariamente con las paredes del tanque y que se mueve al unísono con él y el peso debido a los efectos convectivos, que representa la fracción del peso del contenido que oscila independientemente de las paredes del tanque. A la respuesta modal del tanque se debe sumar el aporte a la respuesta del peso de paredes y techo.

A los efectos hidrodinámicos deben sumarse los efectos hidrostáticos. Estas fuerzas generan esfuerzos actuantes (Demanda), los cuales deben ser menores que los admisibles asociados a la resistencia del material con el cual se fabrica el tanque (Resistencia).

En la Figura 4, se muestra el modelo idealizado de masas (techo, paredes y contenido almacenado) y fuerzas en la base del tanque, expresadas como un corte basal y un momento de volcamiento. El peso W_1 que representa los efectos impulsivos a una altura X_1 de la base del tanque. El peso W_2 que representa los efectos convectivos a una altura X_2 de la base del tanque. Los valores W_p y W_{te} son pesos de las paredes y del techo, respectivamente, mientras que X_p y X_{te} son las alturas de los centros de gravedad de W_p y W_{te} , respectivamente.

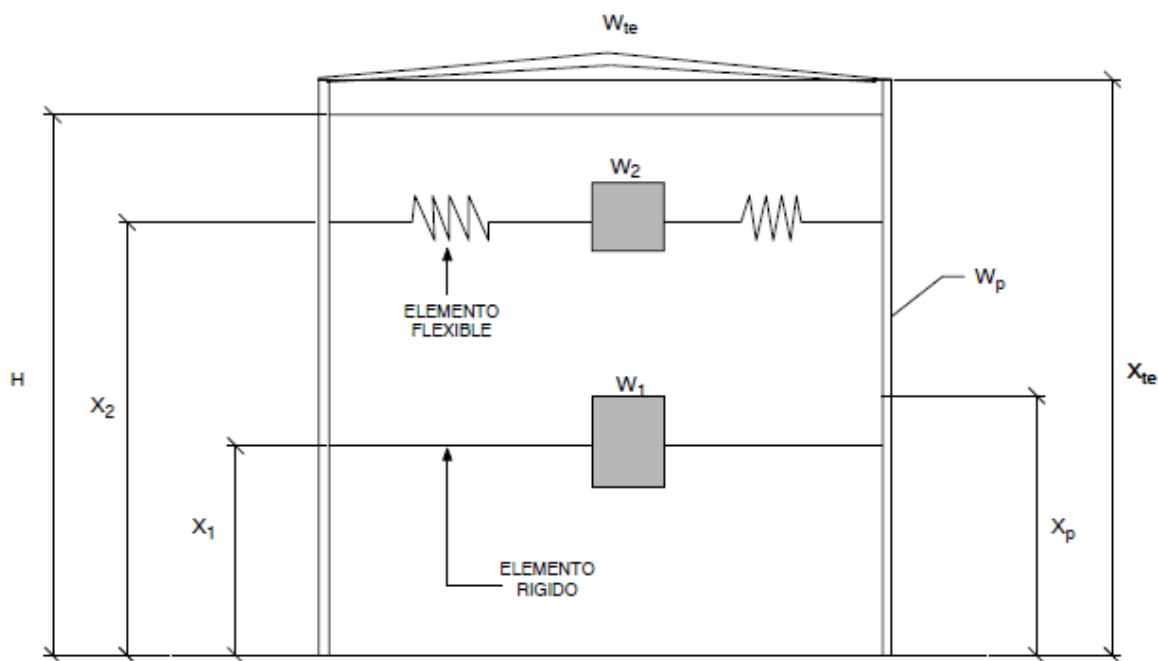


Figura 4. Modelo matemático para estimación de fuerzas en la base del tanque.

Fuente: PDVSA JA-221 (2014, p. 31)

Las relaciones entre los pesos efectivos W_1 y W_2 y el peso total de líquido que almacena el tanque, W (expresada en kilogramos), es decir W_1/W y W_2/W , están dadas por las Ecuaciones (10) a la (12).

$$W_1 / W = 100 - 0,218(D/H_L) \quad \text{si } (D/H_L) \leq 1,33 \quad (\text{Ec } 10)$$

$$W_1 / W = \frac{\tanh [0,866(D/H_L)]}{0,866(D/H_L)} \quad \text{si } (D/H_L) > 1,33 \quad (\text{Ec } 11)$$

$$W_2 / W = 0,230 (D/H_L) \tanh \left(\frac{3,67}{D/H_L} \right) \quad (\text{Ec } 12)$$

Siendo D el diámetro nominal del tanque y H_L la altura del líquido almacenado, con relación a la base del tanque. Ambos expresados en metros.

Por otro lado, las relaciones entre las alturas X_1 y X_2 de los pesos efectivos y la altura total de líquido que almacena el tanque, H_L , es decir X_1/H_L y X_2/H_L , están definidas por las Ecuaciones (13) a la (15).

$$X_1 / H_L = 0,50 - 0,094(D/H_L) \quad \text{si } (D/H_L) \leq 1,33 \quad (\text{Ec } 13)$$

$$X_1 / H_L = 0,375 \quad \text{si } (D/H_L) > 1,33 \quad (\text{Ec } 14)$$

$$X_2 / H_L = 100 - \frac{\cosh \left(\frac{3,67}{D/H_L} \right) - 1,00}{\left(\frac{3,67}{D/H_L} \right) \cdot \sinh \left(\frac{3,67}{D/H_L} \right)} \quad (\text{Ec } 15)$$

Los períodos de vibración T_1 y T_2 , correspondientes a los primeros modos de vibración asociados a los efectos impulsivos y convectivos de las vibraciones en dirección horizontal del sistema tanque-líquido, respectivamente y vienen dados por las Ecuaciones (16) y (17).

$$T_1 = 1,762 \frac{H_L}{K_h} \sqrt{\frac{\gamma_L}{gE}} \quad (\text{Ec } 16)$$

$$T_2 = \frac{20\pi \sqrt{\frac{D}{2g}}}{\sqrt{184 \tanh\left(184\left(\frac{H_L}{D}\right)\right)}} \quad (\text{Ec } 17)$$

Siendo γ_L , el peso específico del líquido expresado en kg/m^3 , g la aceleración de gravedad igual a 981 cm/s^2 , E es el módulo de elasticidad del acero igual a $2.100.000 \text{ kg/cm}^2$ y el parámetro adimensional, k_h , que puede ser estimado con la Figura 3 o Tabla A.6.1 de la Norma técnica PDVSA FJ-251, siendo t_m el espesor promedio (en milímetros) de los anillos que conforman la pared del tanque y r el radio nominal del tanque, en metros.

El período de vibración, T_v , correspondiente al primer modo vertical del sistema tanque – líquido, viene dado por la Ecuación (18).

$$T_v = 1762 \frac{H_L}{k_v} \sqrt{\frac{\gamma_L}{gE}} \quad (\text{Ec } 18)$$

k_v es un parámetro adimensional, que puede ser estimado con la Figura 4 ó Tabla A.6.2 de la Norma técnica PDVSA FJ-251.

En la derivación de las fórmulas para el cálculo de los periodos de vibración se ha supuesto un módulo de *Poisson* del acero igual a 0,30 y se ha despreciado el efecto que tiene la interacción suelo-estructura. En términos generales esta interacción eleva el valor de estos períodos. Este efecto es más pronunciado en el caso de tanques apoyados sobre suelos blandos, similares a los clasificados como tipo S3 o S4. En estas condiciones pudiese esperarse un aumento significativo del período fundamental, lo que, en el caso particular de tanques de período muy corto, acarrearía un aumento en las fuerzas sísmicas. En estos casos, se pueden incorporar los efectos de interacción suelo-estructura.

La interacción suelo–estructura también produce un aumento en el amortiguamiento equivalente del sistema tanque-líquido-suelo; este efecto ha sido incorporado en la asignación de los valores dados en la Tabla 4.

Las fuerzas resultantes en la base del tanque se obtienen combinando las fuerzas debidas a los efectos impulsivos y convectivos. Dado que estas fuerzas están asociadas a dos modos de vibración diferentes, uno impulsivo y convectivo, que tienen sus períodos bien separados, la fuerza máxima probable está dada por (el método del valor máximo probable) la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las fuerzas individuales.

La fuerza cortante, V , y el momento flector, M , en la base del tanque vienen dados por las Ecuaciones (19) a la (21) y (22) a la (24), respectivamente.

$$V_1 = Ad_1 (W_1 + Wp + Wte) \quad (\text{Ec } 19)$$

$$V_2 = Ad_2 W_2 \quad (\text{Ec } 20)$$

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (\text{Ec } 21)$$

$$M_1 = Ad_1 (W_1 \cdot X_1 + Wp \cdot Xp + Wte \cdot Xte) \quad (\text{Ec } 22)$$

$$M_2 = Ad_2 W_2 \cdot X_2 \quad (\text{Ec } 23)$$

$$M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \quad (\text{Ec } 24)$$

Siendo Ad_1 y Ad_2 las ordenadas espectrales para los espectros de diseño impulsivos y convectivos de la componente horizontal del sismo y son adimensionales.

El esfuerzo circunferencial máximo de tracción en el anillo inferior de la pared del tanque, σ , expresado en kgf/cm^2 , se obtiene suponiendo que la presión hidrostática sobre la pared del tanque está distribuida uniformemente en su altura. El esfuerzo debido a la presión hidrostática, σ_{hid} , está dado por la Ecuación (25), el mismo se superpone con los esfuerzos debidos a las componentes vertical, σ_v , y horizontal, σ_h , del sismo, tal como se indica en las Ecuaciones (26) y (27), respectivamente. El efecto neto está dado en la Ecuación (28).

$$\sigma_{hid} = \frac{\gamma_L \cdot H_L \cdot D}{20t_c} \quad (\text{Ec } 25)$$

$$\sigma_h = \frac{0,8V}{10\pi \cdot H_L \cdot t_c} \quad (\text{Ec } 26)$$

$$\sigma_v = \frac{\gamma_L \cdot H_L \cdot D}{25t_c} Ad_v \quad (\text{Ec } 27)$$

$$\sigma = \frac{\gamma_L \cdot H_L \cdot D}{20t_c} + \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_v^2} \quad (\text{Ec } 28)$$

Donde Ad_v es la ordenada espectral del espectro de la componente vertical del sismo, es adimensional, la cual se obtiene con el periodo T_v dada por la Ecuación (18) y t_c es el espesor del anillo inferior, en milímetros.

El esfuerzo circunferencial máximo de tracción actuante en el anillo inferior de la pared, σ , no debe exceder el esfuerzo de diseño admisible, S_d , en tracción del material de fabricación del primer anillo del tanque multiplicado por 1,33.

El esfuerzo máximo de compresión en el anillo inferior de la pared del tanque, f_c , expresado en kg/cm^2 , se obtiene suponiendo los efectos del peso del techo del tanque, W_{te} , y la componente del par de fuerzas que resultan de la descomposición del momento flector en la base del tanque, M , las cuales dan lugar a la fuerza de compresión total en el anillo inferior del tanque, b , tal como se indica en las Ecuaciones (29) a la (31).

$$b = Wt + \frac{1,273 (0,80M)}{D^2} \quad (\text{Ec } 29)$$

$$Wt = \frac{Wp + W_{te}}{\pi D} \quad (\text{Ec } 30)$$

$$f_c = \frac{b}{10t_c} \quad (\text{Ec } 31)$$

El esfuerzo máximo de compresión actuante en el anillo inferior de la pared del tanque, f_c , no debe exceder el esfuerzo admisible en compresión del material de fabricación del primer anillo del tanque, F_a , dado por las Ecuaciones (32) y (33).

$$F_a = 844 \left(\frac{t_c}{D} \right) \quad \text{si} \quad \frac{G H_L D^2}{t_c^2} \geq 44 \quad (\text{Ec } 32)$$

$$F_a = 388 \left(\frac{t_c}{D} \right) + 68,7 \sqrt{G H_L} \quad \text{si} \quad \frac{G H_L D^2}{t_c^2} < 44 \quad (\text{Ec } 33)$$

Donde G es la gravedad específica del líquido contenido en el tanque. La altura máxima de oscilación del líquido viene dada por la Ecuación (34).

$$h = 0,48 D A d_2 \quad (\text{Ec } 34)$$

2.2.4. Definición de la vulnerabilidad sísmica

La preocupación por el tema de la vulnerabilidad sísmica surge de la experiencia humana condiciones o situaciones extremas, que reducen la seguridad estructural o su complementario la vulnerabilidad. De esta manera forma surgen las siguientes definiciones formales:

- Incapacidad de una comunidad para absorber, mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente.
- Condición en la cual los asentamientos humanos o los edificios se encuentran en peligro en virtud de su proximidad a una amenaza, la calidad de la construcción o ambos factores.

Estas definiciones son generales y se refieren a una condición global de los asentamientos humanos. Para unificar las definiciones involucradas en los análisis de vulnerabilidad, la United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO) y la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), promovieron en el año 1979, una reunión de expertos, de la cual resulta el informe de la UNDRO-UNESCO (1979), titulado “Natural Disasters and Vulnerability Analysis”, en el que se define la vulnerabilidad como: “Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de

un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).

Utilizando como base las definiciones propuestas por la UNDRO-UNESCO (1979), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), en el marco del Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales, (OPS, 1993), define la vulnerabilidad sísmica como: “Grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento sísmico desastroso”.

En este contexto, la vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su comportamiento, que puede entenderse como una medida de los daños probables inducidos sobre edificaciones por los diferentes niveles de movimientos del terreno debido a sismos, y que convencionalmente se expresan en una escala que va desde 0 (sin daño) hasta 1 (pérdida total).

Para realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica se debe definir su naturaleza y alcance, condicionándolo al tipo de daño que se pretende evaluar o al nivel de amenaza existente.

2.2.5. Métodos de análisis de la vulnerabilidad sísmica

Debido a que no existen criterios unificados en la forma de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, muchos investigadores del área han propuesto diversos esquemas para sistematizar las diferentes metodologías. La selección de estas metodologías está directamente relacionada con la escala de análisis y las características de los elementos bajo estudio. A continuación se presentan las propuestas que se consideran más importantes dentro del ámbito profesional.

A. DE ACUERDO AL TIPO DE RESULTADO QUE PRODUCEN:

Corsanego y Petrini (1990) promueven esta como una de las metodologías más reconocida y completa, en la cual la evaluación se agrupan en cuatro grupos: técnicas directas, indirectas, convencionales e híbridas.

A.1. Técnicas Directas

Permite predecir directamente y en una sola etapa, el daño causado por un sismo a una estructura, mediante los siguientes métodos:

A.1.1. Métodos Tipológicos: consideran las estructuras como elementos de clases, definidas por los materiales, las técnicas y cualquier elemento que puede afectar la respuesta sísmica de la estructura. En estos momentos la vulnerabilidad es expresada mediante la probabilidad condicional de que una estructura de un tipo definido sufra un nivel de daño dado, basándose en los daños observados en sismos pasados.

Este método requiere una investigación sencilla en campo y sus resultados solo se consideran válidos en sentido estadístico. Una limitación importante a tener en cuenta es que no permite tener en cuenta las modificaciones que ha sufrido la estructura en el transcurso de su vida útil.

Withman, Reed y Hong, (1974) realizaron un levantamiento de daños con ocasión del sismo de San Fernando en 1971 (USA), se considera una de las primeras aplicaciones de este método, generando matrices de probabilidad de daño para aproximadamente 1600 construcciones.

A.1.2. Métodos Mecánicos: Por medio de modelos estructurales predicen los efectos de acciones externas, se distinguen dos grupos relacionados con el modelo analítico utilizado para representar la estructura:

a) Métodos analíticos basados en modelos simples: Son métodos analíticos que hacen uso de modelos estructurales simples, que requiere un mínimo de parámetros de entrada para poder evaluar el comportamiento sísmico de la edificación. Se pueden considerar dentro de este método las propuestas de (Gulkan, Sozen, Demir y Ersoy, 1996) y (Calvi,1999).

b) Métodos de análisis detallado: Son aplicables solo a construcciones representables por modelos mecánicos, involucrando el correcto detallado y modelos refinados adecuado a los respectivos escenarios sísmicos. Los

procedimientos de análisis más utilizados por este tipo de métodos son el análisis lineal (estático y dinámico) y el análisis no lineal (estático y dinámico).

A.2. Técnicas Indirectas

Las técnicas indirectas determinan en primer lugar un índice de vulnerabilidad y luego establecen una relación entre el daño y la intensidad sísmica mediante estudios estadísticos. Para el análisis sísmico a gran escala este método resulta muy adecuado. El método de índice de vulnerabilidad es un claro ejemplo de este método, y consiste en clasificar los edificios mediante la observación de sus características físicas, apoyándose en cálculos estructurales simplificados e identificando aquellas características que controlen el daño estructural.

A.3. Técnicas Convencionales

Proponen un índice de vulnerabilidad independientemente de la predicción del daño y son técnicas esenciales heurísticas. Se utilizan básicamente para realizar comparaciones de la vulnerabilidad relativa entre construcciones de una misma tipología ubicadas en áreas de igual sismicidad. Estas técnicas están basadas en el juicio de expertos.

Se diferencian dos grupos de métodos para esta técnica, los primeros se basan en calificaciones empíricas de las características físicas de la estructura y los segundos se basan en los criterios utilizados por las normativas de diseño sismorresistentes.

A.4. Técnicas Híbridas

Las técnicas híbridas combinan elementos de los métodos anteriores con el juicio de los expertos, tomando específicamente aquellos aspectos relevantes de las otras técnicas que son útiles en la resolución de un problema particular.

B. DE ACUERDO LA ENTRADA DE DATOS, MÉTODOS EMPLEADOS Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS:

Dolce (1994), en base de la clasificación anterior, propone un nuevo criterio de clasificación, examinando separadamente las etapas fundamentales de un análisis

de vulnerabilidad: la entrada de datos, el método empleado y los resultados obtenidos.

B.1. Entrada de datos: Establece los datos disponibles para desarrollar el método:

- Datos de daños registrados después de un sismo u obtenido a través de ensayos de laboratorio en elementos simples o compuestos.
- Características geométricas y/o cualitativas.
- Características mecánicas (masa, rigidez, ductilidad, etc.).
- Caracterización sísmica de la zona (intensidad macrosísmica, aceleración máxima del terreno, velocidad, desplazamiento, etc.).
- Datos geológicos y geotécnicos de la zona (perfil geológico, propiedades mecánicas del suelo, etc.).

B.2. Métodos empleados: Técnica adoptada para determinar el grado de vulnerabilidad, considera tres tipos:

B.2.1. Métodos estadísticos: Se basan en el análisis estadístico de las estructuras, las características de los datos se corresponden con los primeros definidos en el punto anterior. Definen la vulnerabilidad como la probabilidad condicional de una estructura de sufrir un nivel de daño para una intensidad sísmica determinada.

B.2.2. Métodos mecánicos o analíticos: Basándose en los modelos mecánicos para predecir el daño, estudian los principales parámetros (deriva máxima de piso, ductilidad, etc.) que representan el comportamiento dinámico de la estructura.

B.2.3. Métodos de juicio de expertos: con base en el juicio de expertos se realizan evaluaciones cualitativas y/o cuantitativas de los diferentes factores que gobiernan la respuesta sísmica de las edificaciones.

B.3. Resultados Obtenidos: De acuerdo al resultado obtenido se consideran dos clases:

B.3.1. Vulnerabilidad Absoluta: Representa el daño medio como una función de la intensidad sísmica (funciones de vulnerabilidad), o alternativamente la distribución condicional del daño para una determinada intensidad sísmica.

B.3.2. Vulnerabilidad Relativa: Índices de vulnerabilidad obtenidos empírica o experimentalmente, donde no se presenta ninguna correlación con el daño y la intensidad sísmica no está definida.

C. DE ACUERDO A LA FUENTE DE INFORMACIÓN:

Agrupar en tres tipos los métodos, en función de la fuente de información utilizada:

C.1. Métodos Empíricos: Se basan en la experiencia sobre el comportamiento sísmico de las edificaciones, son utilizados cuando se dispone de poca información y/o para evaluaciones preliminares. Son métodos económicos de implementar debido a la poca exigencia que tienen. Estos métodos incluyen los siguientes métodos:

C.1.1. Métodos de categorización: Según su tipología clasifican la estructura en clases de vulnerabilidad con base en la experiencia obtenida en estructuras similares sometidas a movimientos sísmicos en el pasado.

C.1.2. Métodos de inspección y puntaje: Caracterizan e identifican las deficiencias sísmicas de una edificación mediante el puntaje numérico asignado a cada uno de sus componentes, que ponderados en función de su importancia determinan un índice de vulnerabilidad.

C.2. Métodos analíticos o teóricos: utilizan modelos mecánicos de la estructura para evaluar la resistencia estimada de la edificación. Es un método laborioso, exigente y costoso, que depende de la calidad de la información sobre la estructura, el refinamiento del modelo empleado y el refinamiento del modelo empleado y la sofisticación de la evaluación.

C.3. Métodos experimentales: Son métodos experimentales orientados a determinar las propiedades dinámicas y cualquier otra característica importante de la estructura, para lo cual utilizan ensayos dinámicos.

2.2.6. Métodos de cuantificación de la vulnerabilidad sísmica

Conocidos los distintos métodos de análisis disponibles para calcular la vulnerabilidad, se debe utilizar algún medio para presentar sus resultados. El medio escogido debe representar adecuadamente la descripción del daño que experimentara una edificación al someterla a un sismo de intensidad determinada.

Actualmente, se consideran relevantes dos técnicas: las primeras son las técnicas relativas, las cuales no permiten estimar de forma directa los daños esperados para un nivel de intensidad determinada. Estas técnicas se basan en la definición de clases de vulnerabilidad e índices de vulnerabilidad. Las segundas corresponden a las técnicas absolutas, las cuales estiman de manera directa el daño para los diferentes niveles de intensidad sísmica, conduciendo a relaciones explícitas.

2.2.7. Índices de vulnerabilidad

Los índices de vulnerabilidad representan parámetros relativos que permiten cuantificar la susceptibilidad de una construcción de sufrir daños. Se basan en el estudio y reconocimiento de los principales componentes de una estructura, tanto estructurales como no estructurales, identificando y caracterizando las deficiencias sísmicas potenciales, y valorándolos posteriormente por criterios establecidos con base en el juicio de expertos.

A partir de estudios realizados después del terremoto de Friuli en Italia en 1976, comienza a desarrollarse el método de índice de vulnerabilidad, luego el Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) adopta este método para evaluación del riesgo sísmico de edificios (GNDT, 1986). El GNDT ha impulsado el desarrollo de este método tal como lo indica en sus nuevas especificaciones GNDT, (1990).

Benedetti y Petrini (1984) proponen un índice de vulnerabilidad, I_v , expresado a través de la siguiente ecuación:

$$I_v = \sum_{I=1}^n (K_I W_I) \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde los valores de K_i y W_i son subjetivos y se basan en el juicio de expertos.

2.2.8. Caracterización de variables aleatorias y estados límites

El problema de la determinación de la fiabilidad de un sistema estructural, implica la consideración de las incertidumbres que afectan a las variables que controlan la respuesta del sistema. El paso previo consisten en la adecuada caracterización estadística y probabilística de esas variables aleatorias.

Una vez caracterizadas las variables básicas de un sistema estructural, la determinación del grado de seguridad del mismo, debe hacerse en términos de probabilidad de falla a lo largo del periodo de la vida previsto y en relación a una serie de criterios de aceptación denominados Estados Límites.

Los Estados Límites establecen, de forma cuantitativa, el valor para el que se considera se produce la falla de la estructura frente a un determinado estado de carga. Su definición se realiza en función de los condicionantes de la rutina y funcionalidad de la obra en cada caso.

Los Estados Límites más restrictivos que afectan al colapso total o parcial de la estructura (rotura de secciones críticas, pandeo por inestabilidad elástica o plástica, etc.), reciben el nombre de Estados Límites Últimos. Los que se refieren a criterios de funcionalidad de la obra construida (flechas, fisuración, vibración, etc.), reciben el nombre de Estados Límites de Servicio.

Para el problema del cálculo de la fiabilidad la directriz fundamental que se ha de cumplir es que dichos estados deben de poder ser relacionados numéricamente con las variables básicas que definen el problema a través de la función de falla.

En el caso más sencillo se tendrán dos variables: R que se representa de forma general la “resistencia” de la estructura y S que representa la sollicitación o el “efecto de la carga”, ambas definidas en relación a un determinado estado límite. De esta forma la función de falla, g , se puede establecer como: $g = R - S$, y la falla se produce cuando $R - S \leq 0$, es decir, el estado límite se incumple cuando el efecto de la carga supera la capacidad de la estructura. En términos generales en

el problema influirán “n” variables básicas aleatorias, de manera que la función de falla será de la forma $g = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Geométricamente en la Figura 5 se distingue dos regiones: la región de falla o fallo, en la que se incluyen todas las combinaciones posibles de valores de las variables para las que se cumple la condición fijada por el estado límite estudiado y la región segura, donde se sitúan las combinaciones de valores de las variables que resultan aceptables en relación al mismo estado límite.

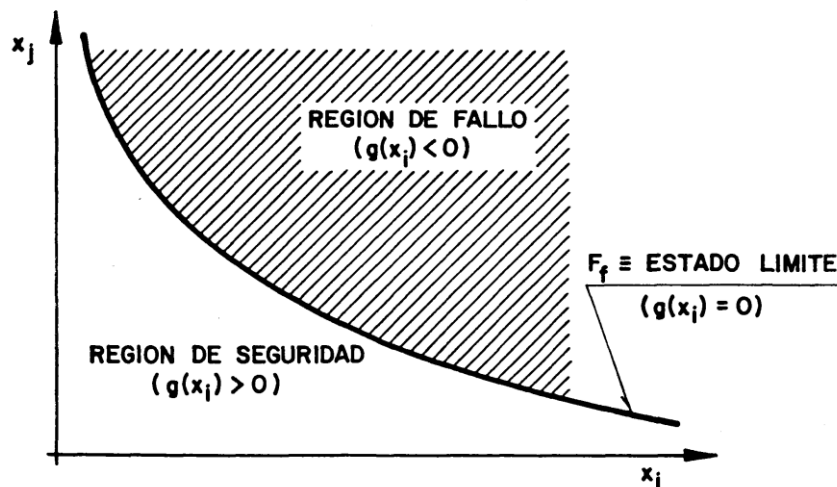


Figura 5. Regiones de falla y seguridad

Fuente: Gómez, M. y Alarcón, E. (1992, p. 9)

2.2.9. Métodos de comprobación de la seguridad

Dependiendo del grado de información del que se disponga sobre el problema estructural, el Joint Committee on Structural Safety (JCSS) CEB-CECM-CIB-FIPLABSE- LASSS-RILEM (1975), agrupó los métodos de verificación de la seguridad en los siguientes niveles:

NIVEL I: Con una base semi-probabilista, utilizan factores parciales de ponderación de las cargas, γ_s , y resistencias, γ_R relacionados con los valores característicos predefinidos o valores normales. Se incluye en este nivel el tradicional formato en Tensiones Admisibles. Este tipo de procedimientos fue inicialmente designado como formato en Estados Límites; Sin embargo, los “estados límites” dependen del “límite” que se analice.

NIVEL II: Métodos que utilizan procedimientos aproximados para obtener valores numéricos de la probabilidad de falla. Frecuentemente están asociados a una representación simplificada de las distribuciones de probabilidad, ya que únicamente utilizan, para definir las, los momentos de segundo orden o inferiores: valor medio, desviación típica y covarianza.

NIVEL III: Implica una descripción probabilística completa de la función de distribución conjunta de las variables básicas que afectan a la respuesta de la estructura.

NIVEL IV: Métodos que evalúan la probabilidad de fallo con objeto de minimizar el costo generalizado de la estructura. Construcción + Mantenimiento + Reparación, en caso de falla. Este tipo de procedimiento es apropiado para sistemas en los que las pérdidas económicas producidas, en el caso de funcionamiento incorrecto de la estructura, sean mucho mayores que las expectativas de pérdidas de vida humana, o factores tales como las ecológicos o culturales.

Aunque los cuatro niveles representan una jerarquización de los procedimientos existentes para evaluar la seguridad estructural; la clasificación no es, en modo alguno, absoluta; tal caso de procedimientos que utilizan más información de la requerida en los Métodos de Nivel II, no dispone de datos suficientes como para poder evaluar la distribución de probabilidad conjunta, tal y como demandan los de Nivel III.

Esto representa serios problemas ya que por lo general no existen suficientes datos para definir la función de densidad conjunta de las variables que caracterizan al sistema; por otra parte, aun disponiendo de la información necesaria, resulta prácticamente imposible encontrar una solución analítica a la integral multidimensional, debiendo recurrir, en el mejor de los casos, a métodos numéricos para la evaluación de la misma.

Con objeto de soslayar las dificultades anteriores, los Métodos de Nivel II, se presentan como una alternativa eficaz, ya que para caracterizar a las variables básicas, solamente utilizan los momentos de segundo orden e inferiores: covarianza y valor medio. Entre los diferentes métodos a los que se ha hecho

mención; los Métodos de Nivel II, debido a su simplicidad, gozan de una gran popularidad provocada por la abundante utilización de los mismos en la elaboración de códigos de proyecto.

Esta es la razón por la cual se decidió aplicar Métodos de Nivel II en este trabajo de investigación. En este sentido se presenta a continuación la base teórica del Índice de Fiabilidad de Cornell (β) y el Método de Monte Carlo (MMC).

2.2.10. Índice de fiabilidad de Cornell, β

La fiabilidad se define como “1- P_f ”, siendo P_f la probabilidad de falla, que se calcula a partir de la función de falla correspondiente $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ y dada por la Ecuación (36).

$$P_f = \text{Prob}[g < 0] = \int f_x(x) dx \quad (\text{Ec } 36)$$

Los métodos de Nivel II emplean procedimientos aproximados para resolver esta integral y así obtener valores numéricos de la probabilidad de falla. Solamente necesitan los momentos de segundo orden (media, desviación típica y covarianza) para definir las distribuciones de probabilidad.

En su planteamiento inicial, los métodos de Nivel II, tratan de encontrar una medida de la seguridad, directamente relacionada con la probabilidad de falla y que, sin embargo, no implique necesariamente, la determinación de la misma mediante la integración de la función de densidad conjunta $f_x(x)$. En la terminología usual, esta medida de seguridad se denomina Índice de Fiabilidad de Cornell (β).

Cornell (1969), definió el Índice de fiabilidad, β , en forma matemática a través de la Ecuación (37).

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (\text{Ec } 37)$$

Siendo μ_M la media y σ_M la desviación estándar y su representación gráfica puede verse en la Figura 6.

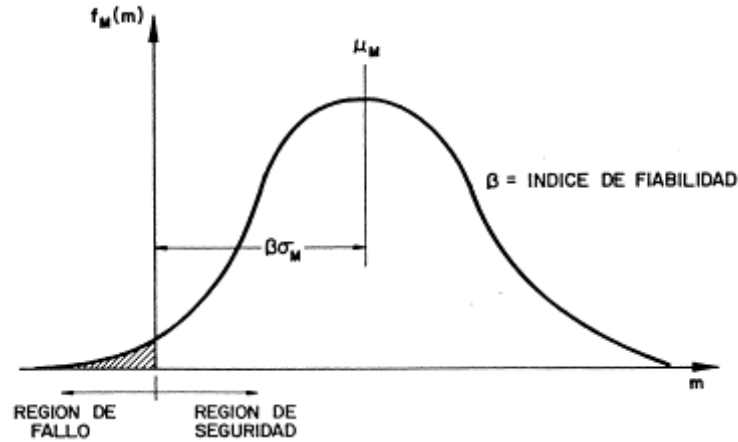


Figura 6. Representación gráfica del índice de fiabilidad de Cornell, β

Fuente: Gómez, M. y Alarcón, E. (1992, p. 19)

El Índice de fiabilidad de Cornell, β , representa el número de desviaciones típicas, σ_M , que separan al valor medio (μ_M) del origen; lo que proporciona una medida de la Fiabilidad del sistema, ya que cuanto más separado esté μ_M del origen (β mayor) menor será la probabilidad de falla del sistema (zona sombreada de la Figura 6). m representa una variable aleatoria y $f_M(m)$ su distribución probabilística.

Para el caso en el que $X = (R, S)$ y el Estado limite $g(X) = R - S = 0$. Siendo el margen de seguridad, M , $M = R - S$ y la probabilidad de falla, establecida en la Ecuación (38).

$$P_f = \text{Prob}[(R - S) \leq 0] = \text{Prob}(M \leq 0) \quad (\text{Ec } 38)$$

Si R y S son variables aleatorias independientes con distribución de probabilidad normales, es decir: $R: N(\mu_R, \sigma_R)$ y $S: N(\mu_S, \sigma_S)$. El procedimiento para implementar el cálculo del Índice de Fiabilidad de Cornell, β , se muestra a continuación:

1, M será una variable aleatoria con distribución de probabilidad $N(\mu_M, \sigma_M)$, definida a través de las Ecuaciones (39) y (40).

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \quad (\text{Ec } 39)$$

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 - \sigma_S^2 \quad (\text{Ec } 40)$$

2. La probabilidad de falla puede reescribirse como se indica en la Ecuación (41).

$$P_f = \Phi\left(\frac{0 - \mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi\left(\frac{-(\mu_R - \mu_S)}{(\sigma_S^2 - \sigma_R^2)^{1/2}}\right) = \Phi(-\beta) \quad (\text{Ec 41})$$

Siendo Φ la función de distribución de la variable $N(0,1)$, por lo que el Índice de Fiabilidad de Cornell, β , puede obtenerse mediante las tablas de distribución de probabilidad normal. Así por ejemplo, un Índice de fiabilidad $\beta = 3$ corresponde a una probabilidad de falla de 0,1349; es decir un 13,89%.

3. Si el número de Variables Básicas (VB) implicadas en la resolución del problema es n y la función de falla puede representarse mediante un hiperplano definido por la Ecuación (42).

$$g(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i = a_0 + \underline{a}^T \cdot \underline{X} \quad (\text{Ec 42})$$

Donde $\underline{X}$ es un vector columna formado por las VB y $\underline{a}^T$ son los valores conocidos a_i . El margen de seguridad correspondiente a la función de falla está dado por la Ecuación (43).

$$M = a_0 + \underline{a}^T \cdot \underline{X} \quad (\text{Ec 43})$$

El Índice de Fiabilidad, β , queda expresado por la Ecuación (44).

$$\beta = \frac{a_0 + \underline{a}^T \cdot E[\underline{x}]}{\sqrt{\underline{a}^T \cdot \underline{C}_x \cdot \underline{a}}} \quad (\text{Ec 44})$$

Siendo $E[\underline{x}]$, el vector de valores medios y $\underline{C}_x$, la matriz de covarianza de $\underline{X}$. Al substituir se obtiene, en forma matricial, la Ecuación (45).

$$E[\underline{x}] = \begin{bmatrix} \mu_{x1} \\ \mu_{x2} \\ \vdots \\ \mu_{xm} \end{bmatrix}; \quad \underline{C}_x = \begin{bmatrix} \text{VAR}(x_1) & \text{COV}(x_1, x_2) & \dots & \text{COV}(x_1, x_n) \\ \text{COV}(x_2, x_1) & \text{VAR}(x_2) & & \text{COV}(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{COV}(x_n, x_1) & \text{COV}(x_n, x_2) & \dots & \text{VAR}(x_n) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec 45})$$

4. Se define el Coeficiente de seguridad central, C_o , por la Ecuación (46).

$$\beta = \frac{\mu_R}{\sigma_S} \quad (\text{Ec } 46)$$

5. Y los coeficientes de variación de la resistencia R y del efecto que produce la carga o sollicitación S, a través de las Ecuaciones (47) y (48), respectivamente.

$$V_R = \frac{\mu_R}{\sigma_R} \quad (\text{Ec } 47)$$

$$V_S = \frac{\mu_S}{\sigma_S} \quad (\text{Ec } 48)$$

6. La relación entre β y C_o , puede derivarse de una forma sencilla, teniendo en cuenta la definición de Índice de Fiabilidad de Cornell, dado por la Ecuación (49).

$$\beta = \left(\frac{\mu_M}{\sigma_M} \right) = \left(\frac{\mu_R - \mu_S}{(\sigma_S^2 - \sigma_R^2)^{1/2}} \right) = \frac{\mu_R - \mu_S}{(V_S^2 \mu_S^2 + V_R^2 \mu_R^2)^{1/2}} \quad (\text{Ec } 49)$$

7. Finalmente al dividir por μ_S , se obtiene β por la Ecuación (50).

$$\beta = \frac{C_o - 1}{(V_S^2 - V_R^2 C_o^2)^{1/2}} \quad (\text{Ec } 50)$$

Y C_o , por la Ecuación (51).

$$C_o = \frac{1 + \beta(V_R^2 + V_S^2 - \beta V_R^2 \cdot V_S^2)^{1/2}}{1 - \beta^2 V_R^2} \quad (\text{Ec } 51)$$

La última expresión indica que el Coeficiente de seguridad central, C_o , depende de las incertidumbres asociadas a R y S, es decir a medida que aumentan V_R y V_S , mayor es el valor de C_o que ha de considerarse para obtener la misma probabilidad de falla. Lo que pone de manifiesto las deficiencias de las medidas deterministas al momento de establecer márgenes de seguridad.

2.2.11. Métodos de simulación

La simulación se define como el proceso de diseñar un modelo a partir de un sistema real y realizar (simular) experimentos con él para entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o por un conjunto de criterios) para la operación del sistema. Por lo que se entiende que el proceso de simulación incluye tanto la construcción del modelo como su uso analítico para estudiar un problema.

Un modelo de simulación comúnmente toma la forma de un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresado con relaciones matemáticas lógicas entre las variables de interés del sistema. La simulación se emplea comúnmente para:

1. Descubrir el comportamiento de un sistema.
2. Postular teorías o hipótesis que expliquen el comportamiento observado y
3. Usar esas teorías para predecir el comportamiento futuro del sistema, es decir mirar los efectos que se producirían en el sistema.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación se procede con el cálculo probabilístico. Un aspecto importante de la simulación es el número de repeticiones del “experimento” a efectos de obtener la mayor fiabilidad y minimizar el error al estimar la probabilidad de falla o su complemento la fiabilidad del sistema.

Alarcón (2004) y Torres (2004), proponen para un enfoque probabilístico, aplicar el método de Nivel II de Monte Carlo. Este método permite estimar probabilidades de falla de manera confiable.

El margen de seguridad de un sistema se puede definir a través de la función de falla, F que resulta de la diferencia entre la Capacidad (C) y la Demanda (D), es decir $F=C-D$. Si la función de falla es mayor que cero, el sistema es seguro. La probabilidad de falla es la probabilidad de que la función de falla sea menor que cero.

No obstante, la sencillez del concepto, el planteamiento teórico de un análisis probabilístico resulta algunas veces muy compleja haciendo que la evaluación analítica del mismo sea prácticamente una tarea imposible. Debido a ello, se hace necesario considerar el uso de métodos numéricos que permitan realizar el análisis probabilístico de una forma aproximada. Uno de los métodos más ampliamente usados es el Método de Monte Carlo (MMC), el cual permite resolver problemas mediante numerosas simulaciones de las Variables Aleatorias (VA) que gobiernan el problema. Los valores de las VA que intervienen en el problema son generados en forma aleatoria.

2.2.12. Métodos de Monte Carlo (MMC)

Es un método de simulación cuyas aplicaciones se encuentran en numerosos campos como los de la biología, genética, física, estadística e ingeniería. Con esta técnica es posible encontrar la solución de un problema numérico, normalmente un problema de probabilidades, empleando experimentos de muestreo artificial aleatorio.

La importancia actual del MMC se basa en los siguientes factores:

- La existencia de problemas numéricos de muy difícil solución por métodos exclusivamente analíticos.
- El desarrollo de las aplicaciones mediante un computador, que permite que los experimentos no se tengan que realizar físicamente sino mediante simulaciones de números aleatorios que pueden seguir diferentes tipos de distribuciones estadísticas e incluso estar correlacionados.
- La posibles aplicaciones, que han trascendido a las propias matemáticas (ecuaciones diferenciales parciales de Laplace o de Schrödinger, integrales, redondeos aleatorios, entre otras.)

2.2.13. Funciones de falla

Las funciones de falla para los esfuerzos de compresión, FF_c , y tracción, FF_t , en el anillo inferior o primer anillo de la pared del tanque, vienen dadas por las Ecuaciones (52) y (53), respectivamente.

$$FFc = Fa - fc \quad (Ec\ 52)$$

$$FFt = 133Sd - \sigma \quad (Ec\ 53)$$

Conviene hacer la salvedad de que aun cuando los esfuerzos han sido estimados en el primer anillo de la pared del tanque, un modelo matemático similar podría ser derivado para el resto de los anillos. No obstante, en el primer anillo es donde se concentran los mayores esfuerzos y los problemas de corrosión.

2.3. Marco Organizacional

Este trabajo va dirigido para la Gerencia de Materiales y confiabilidad Operacional de PDVSA, encargada de dirigir los mantenimientos de los activos de las empresas. También para todas las industrias que manejen estos tipos de tanques de almacenamientos.

2.4. Bases éticas y legales

En este trabajo para la estimación de las acciones sísmicas, se aplicó la norma técnica PDVSA JA-221, equivalente a la norma COVENIN 3621 “Diseño sismorresistente de instalaciones industriales”. Para la comparación de la demanda y la capacidad o resistencia se utilizó la norma técnica PDVSA FJ-251 equivalente a la norma COVENIN 3623 “Diseño sismorresistente de tanques metálicos”.

2.5. Glosario de términos

Acelerograma: Registro de la variación en el tiempo de las aceleraciones del movimiento del terreno en un punto y en una dirección. (FUNVISIS, 2002. La Investigación Sismológica en Venezuela, p. 85).

Acelerómetro: Instrumento que registra las aceleraciones producidas por un movimiento del terreno. En sismología se le utiliza principalmente para medir cuantitativamente la severidad del movimiento del suelo al paso de las ondas sísmicas por el punto de observación. (FUNVISIS, 2002. La Investigación Sismológica en Venezuela, p. 85).

Amortiguamiento: Capacidad de los materiales y sistemas estructurales para disipar energía. No incluye la disipación por incursiones en el rango inelástico de las deformaciones. (PDVSA JA-221, 2014, p. 05).

Acciones sísmicas: Se refiere las acciones derivadas de la ocurrencia de sismos, que pueden tener afectación sobre las estructuras, tales como los debidos a la inestabilidad del terreno, desplazamiento de fallas, tsunamis, entre otros. (PDVSA JA-221, 2014, p. 05).

Análisis Dinámico: Es un análisis de superposición modal en el cual las acciones sísmicas se caracterizan mediante un espectro de diseño o un acelerograma tomando en cuenta las propiedades modales de la estructura y obteniendo la respuesta mediante la combinación de los valores correspondientes a cada modo. (PDVSA JA-221, 2014, p. 05).

Amenaza Sísmica: Cuantifica la ocurrencia de eventos sísmicos futuros, expresada generalmente en términos de la probabilidad de excedencia de cierta intensidad sísmica (o aceleración del suelo), en un tiempo dado y en un lugar determinado. (PDVSA JA-221, 2014, p. 05).

Carga Cíclica: Carga dinámica variable en la que los elementos están sometidos a ciclos de carga, alternando los esfuerzos continuamente. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Carga Permanente: Es la debida al peso propio de todos los componentes estructurales, así como los sistemas y componentes no estructurales permanentes tales como tuberías, plataformas, bandejas, aislantes y equipos fijos. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Carga Variable o de Operación: Es una combinación de cargas probables en condiciones normales de servicio u operación, que la estructura debe ser capaz de resistir con sus elementos estructurales (esfuerzos actuantes), inferiores a su capacidad real (esfuerzos admisibles). (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Cedencia: Condición caracterizada por la plastificación de la región más solicitada del sistema resistente a sismos, tal como la formación de la primera rótula plástica en un componente importante del mismo. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Coeficiente Sísmico: Es el cociente entre la fuerza cortante horizontal de diseño que actúa en el nivel de base (corte basal) y el peso total por encima del mismo. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Capacidad de Absorción de Energía: Es la capacidad del elemento estructural de absorber energía mediante deformación del material que lo constituye. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Capacidad de Disipación de Energía: Es la propiedad del elemento estructural de disipar energía en el rango de deformaciones inelásticas; se relaciona directamente con la ductilidad. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Carga Plástica Límite: Es la carga máxima que se alcanza cuando se ha formado un número suficiente de rótulas plásticas, ocurriendo incrementos significativos de deformación sin incrementos adicionales de carga. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Ciclo de Histéresis: Describe la relación fuerza (esfuerzo) – desplazamiento (deformación unitaria) de un elemento o miembro bajo acciones reversibles. (PDVSA JA-221, 2014, p. 06).

Demanda de Ductilidad: Es la exigencia de ductilidad que se origina en la estructura cuando está sujeta a los movimientos sísmicos de diseño aquí estipulados (véase Ductilidad y Factor de Ductilidad). (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Ductilidad: Es la capacidad que poseen los componentes de un sistema estructural de hacer incursiones alternantes en el dominio inelástico, sin pérdida apreciable en su capacidad resistente (véase Factor de Ductilidad). (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Efectos de sitio: La modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas, se conoce como efecto de sitio y consiste

en la amplificación de dicha señal en varios órdenes de magnitud. (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Efecto P-Delta: Es el incremento de momentos flectores que tienen los elementos verticales (columnas) de un pórtico cualquiera, de cualquier material, por el efecto del desplazamiento horizontal de las plantas y el consiguiente desplazamiento de las cargas verticales. (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Espectro de Diseño: Es aquel espectro asociado a sismos de diseño, en el cual se ha incorporado el factor de reducción de respuesta (Ductilidad) correspondiente al sistema resistente a sismos. (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Espectro de Respuesta: Define la respuesta máxima de osciladores de un grado de libertad y de un mismo amortiguamiento, sometidos a un acelerograma dado, expresado en función del período. (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Estado Límite: Condición en la cual una estructura o una parte de ella cesa de satisfacer una o más de las funciones para las cuales fue diseñada. Pueden clasificarse en dos categorías: (1) estados límites de servicio, relacionado a las condiciones de uso de la estructura y (2) estados límites de agotamiento, que corresponden a la capacidad portante de la estructura; normalmente la seguridad estructural es referida a este tipo de estados límites. (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Estudios de Efectos de Sitio: Evaluación del riesgo sísmico tomando en consideración las condiciones locales del sitio, tales como: espesores de sedimentos, velocidades de ondas de corte a los 30 metros, caracterización de las fuentes sísmicas y su amenaza. (PDVSA JA-221, 2014, p. 07).

Factor de Ductilidad: Es un valor que describe la ductilidad global que puede tolerar el sistema resistente a sismos manteniendo su integridad; este factor cuantifica la relación entre los desplazamientos máximos reales y los desplazamientos calculados suponiendo un comportamiento elástico lineal de la estructura. (PDVSA JA-221, 2014, p. 08).

Factor de Reducción de Respuesta (Ductilidad): Es el factor que divide las ordenadas del espectro de respuesta elástica para obtener el espectro de diseño. (PDVSA JA-221, 2014, p. 08).

Fuerzas de Diseño: Son las fuerzas que representan la acción sísmica sobre las estructuras o sus componentes. Están especificadas a nivel de cedencia incluyendo los efectos torsionales. (PDVSA JA-221, 2014, p. 08).

Grado de Riesgo: Escala de clasificación de riesgos que depende del número de personas expuestas, de las eventuales pérdidas económicas y del impacto ambiental como consecuencia de la falla o mal funcionamiento de la estructura.

Magnitud: Es el valor adimensional que refleja la medida de la energía liberada durante la ocurrencia de un sismo. Puede ser:

Magnitud local o Richter: Se obtiene a partir de la máxima amplitud registrada por un sismógrafo de torsión Wood Anderson con constantes específicas (período de 0.8 segundos, amplificación estática de 2800 y factor de amortiguamiento de 0.8) ubicado a 100 kilómetros de la fuente sísmica.

Magnitud por ondas corpóreas: Se basa en la amplitud máxima de las ondas de cuerpo con períodos entre 0.1 y 3.0 segundos.

Magnitud por ondas superficiales: Para la determinación de la magnitud se toma la amplitud máxima de las ondas Rayleigh de 20 segundos de período.

Magnitud de momento sísmico: Se define a partir de la relación entre la energía radiada y el momento sísmico. Su determinación se reduce a calcular el momento sísmico de las fuerzas que producen el sismo. Esta magnitud tiene la ventaja de no saturarse para altos valores, tiene buena resolución en el sector de energías, y además, se puede definir por observaciones de campo, o utilizando toda la señal del sismograma. (PDVSA JA-221, 2014, p. 08).

Momento Sísmico: Es la cantidad que refleja la energía liberada en un sismo, considerando el área de ruptura y la compensación de la falla con una medida de la resistencia de las rocas. (PDVSA JA-221, 2014, p. 08).

Movimientos de Diseño: Son aquellos movimientos del terreno seleccionados de tal forma que su probabilidad de excedencia sea razonablemente baja durante la vida útil de la estructura y están caracterizados por sus espectros de respuesta. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Nivel de Base: Es el nivel de la estructura donde se admite que las acciones sísmicas se transmiten a ella. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Perfil Geotécnico: Corte transversal de suelo estratificado por el cual se expresan propiedades geotécnicas y sus profundidades. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Período Medio de Retorno: Duración media entre ocurrencias de un evento determinado. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Probabilidad de Excedencia: Probabilidad de que un nivel específico del movimiento del terreno, o un nivel de efectos económicos o sociales causados por el sismo, sea excedido en un lugar o región durante un lapso de tiempo determinado. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Respuesta Sísmica: Describe la respuesta dinámica de una estructura dada, a acciones de tipo sísmico. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Riesgo Sísmico: Es la probabilidad de que en un determinado sitio y durante un determinado tiempo de exposición, las consecuencias económicas o sociales de los sismos, expresadas en unidades monetarias o en víctimas, excedan valores prefijados. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Rótula Plástica: Es una zona de cedencia que se forma en un componente del sistema resistente a sismos, en la cual pueden ocurrir incrementos importantes en las rotaciones inelásticas alternantes, sin modificaciones significativas del momento actuante, el cual es igual al de agotamiento. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Ruina: Es la pérdida de estabilidad de la edificación; ocasionalmente aparece bajo la designación de desplome. (PDVSA JA-221, 2014, p. 09).

Vida Útil: Número de años representativos del tiempo de servicio probable de una instalación. (PDVSA JA-221, 2014, p. 10).

Vulnerabilidad: Una medida de la pérdida de resistencia de un elemento o estructura como resultado de la ocurrencia de un evento sísmico. Medido en una escala de 0 (no daño) a 1 (pérdida total). (PDVSA JA-221, 2014, p. 10).

Zona sísmica: Área geográfica en la cual se admite que el riesgo sísmico esperado es similar en todos sus puntos, en un período de tiempo prefijado. Todos los sitios comprendidos en dicha área presentan parámetros constantes para el diseño sísmico. (PDVSA JA-221, 2014, p. 10).

CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO

A continuación se describe el tipo de estudio, las metodologías para la detección de necesidades y la elaboración de la propuesta, el cronograma y el presupuesto del trabajo; que permitirán alcanzar los objetivos del presente Trabajo Especial de Grado.

3.1. Tipo de Investigación

Según Valarino, Yaber y Cemborain (2010) la investigación es de tipo evaluativa, ya que tiene como propósito determinar sistemáticamente los niveles fiabilidad estructural ante acciones sísmicas en tanques de almacenamientos cilíndricos, verticales, metálicos y no anclados. “Es uno de los tipos de investigación que más apropiadamente corresponden a los proyectos de aplicación en los programas de especialización” (p 70).

3.2. Diseño de la Investigación

Esta investigación busca descubrir las relaciones e interacciones entre las variables determinantes que gobiernan el problema de la fiabilidad estructural ante acciones sísmicas en tanques de almacenamiento cilíndricos, verticales, metálicos y no anclados. Por lo tanto, se buscan explicaciones en forma sistemática, coherente y lógica y en consecuencia, no es una investigación de carácter experimental, sino más bien de campo.

Palella y Martins (2012), indica de la investigación experimental:

... Se observan los hechos tal y como se presentan en su contexto real y en un tiempo determinado o no, para luego analizarlos. Por lo tanto, en este diseño no se construye una situación específica si no que se observan las que existen. Las variables independientes ya han ocurrido y no pueden ser manipuladas, lo que impide influir sobre ellas para modificarlas. (p. 87).

La investigación de campo tiene por objeto el análisis sistemático de problemas en la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos, o predecir su ocurrencia, haciendo uso de métodos característicos de cualquiera de los paradigmas o enfoques de investigación conocidos o en desarrollo. Los datos de interés son recogidos en forma directa de la realidad; en este sentido se trata de investigaciones a partir de datos originales o primarios.

No se debe perder de vista que toda investigación de campo involucra un componente de tipo documental, que parte de la fuente de información secundaria, obtenida de un recuento teórico riguroso, focalizado en la aspiración de precisar aspectos, elementos y restricciones relacionadas con la temática investigada.

Según Palella y Martins (2012), el tipo de investigación a realizar determina los niveles que es preciso desarrollar, por lo que la investigación es de nivel explicativo, ya que: “se centra en determinar los orígenes o las causas de un determinado conjunto de fenómenos complejos y delicados, en los que el riesgo de cometer errores, es alto” (p.93).

En tal sentido, su objetivo es el de encontrar las relaciones causa-efecto de fenómenos o hechos con el propósito de conocerlos y comprenderlos con profundidad.

Lo antes señalado conduce a precisar que la investigación que se realiza tiene un nivel explicativo, ya que los conocimientos que se obtienen en el devenir de la investigación permiten develar cuáles son los factores críticos: estructura, relaciones, procesos, etc.

3.3. Unidad de Análisis

Hernández, Fernández y Baptista (1998) definen unidad de estudio o de análisis “a aquella que se examina, es decir, en la que se busca la información, su naturaleza depende de los objetivos del estudio” (p. 296). Para esta investigación la unidad de análisis son 12 tanques de almacenamiento de crudo, cilíndricos, verticales, metálicos no anclados que conforman en el Patio de Tanque el Tejero (PTT),

ubicado en El Tejero, Estado Monagas y perteneciente a la Unidad de Exploración y Producción de PDVSA.

3.4. Técnicas de Recopilación de Datos

Son aquellas utilizadas por el investigador para recolectar u obtener la información necesaria en función de estudiar la problemática planteada. Sabino (2002) las define como: "... cualquier recurso del que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de éstos la información" (p.143).

En consecuencia, la forma en que se obtendrán los datos y a la concepción del diseño de la investigación de campo, partiendo de la concepción que en una investigación de campo también se emplean datos secundarios, sobre todo provenientes de fuentes bibliográficas, a partir de los cuales se elabora el marco teórico, es importante señalar que Arias (2006), sostiene que: "...son los datos primarios obtenidos a través del diseño de campo, los esenciales para el logro de los objetivos y la solución del problema planteado" (p.31).

La recolección de la información se realizará a través de varias modalidades:

Recolección documental y bibliográfica: este tipo de fuente permite obtener todos aquellos datos secundarios que se necesitan para realizar un trabajo sistemático. Se utilizó esta técnica para acceder a las fuentes escritas que tratan el tema de la fiabilidad estructural y comportamiento de tanques de almacenamiento en sismos pasados, que permiten construir el espectro indagatorio del objeto de estudio. Se recurre además a estudios realizados por institutos y centros de investigación de reconocida trayectoria a nivel nacional como FUNVISIS (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas), el USGS (United State Geological Survey), entre otros.

Observación directa no participante: Para Tamayo y Tamayo (2001), la observación directa se presenta cuando: "...el investigador corrobora los datos que ha tomado, ya sea por testimonios orales o escritos, de personas que han tenido contacto de primera mano con la fuente que proporciona los datos" (p.120).

La información obtenida por las modalidades anteriormente citadas se organiza en forma sistemática y posteriormente se analizan para lograr establecer de manera precisa el problema objeto de investigación y lograr la contrastar los modelos y teorías adaptadas con la realidad concreta expresada en la captura de información.

3.5. Procedimiento de investigación

Se describen a continuación los pasos desarrollados para el logro de cada Objetivo Específico.

Objetivo 1: Describir los tipos tanques de almacenamiento existentes en el PTT y su diseño estructural.

Paso 1: Visita al área física del lugar de estudio para ver en primera persona los tipos de tanques existentes en el PTT.

Paso 2: Revisión técnica de documentos, especificaciones y planos de los tanques existentes, información geotécnica e historial de mantenimiento de los tanques del PTT.

Paso 3: Descripción geométrica y de operación de los tanques de almacenamientos existentes en el PTT.

Resultado: Levantamiento de los datos geométricos, de fundación y de operación, necesarios para el análisis estructural de los 13 tanques del Patio de Tanque el Tejero (PTT), ubicado en El Tejero, Estado Monagas y perteneciente a la Unidad de Exploración y Producción de PDVSA.

Objetivo 2: Determinar las condiciones actuales de los tanques mediante la medición de los espesores de pared, placa anular y su sistema de anclajes, condiciones de operación y cualquier evento sobrellevado por los tanques (fuego, explosiones, asentamientos, entre otros).

Paso 1: Inspección Visual de los tanques de almacenamiento.

Paso 2: Revisión de los resultados de los más recientes estudios de medición de espesores de láminas de pared, fondo y techo de los tanques, cuyos

resultados serán insumos en conjunto con el historial de mantenimiento y operación,

Paso 3: Identificar otros riesgos: choque entre equipos, eléctrico, inundaciones, impacto al ambiente.

Resultado: Condiciones estructurales y de operación actuales de los 13 tanques del Patio de Tanque el Tejero (PTT), ubicado en El Tejero, Estado Monagas y perteneciente a la Unidad de Exploración y Producción de PDVSA.

Objetivo 3: Identificar los tipos de fallas estructurales típicas que se pueden presentar en los tanques de almacenamiento, derivados de eventos sísmicos pasados.

Paso 1: Revisión bibliográfica del comportamiento sismorresistente de tanques de almacenamiento en sismos pasados y sus daños y otros que permiten conocer y evidenciar cómo se suceden los procesos y relaciones que determinan la conducta o comportamiento sismorresistente de tanques de almacenamiento y su contraste con las prescripciones normativas; con la finalidad de determinar qué elementos y tipos de falla se presentan comúnmente en tanque de almacenamiento sometidos a acciones sísmicas.

Paso 2: Revisión bibliográfica del comportamiento sismorresistente de tanques de almacenamiento en sismos pasados para establecer una breve estadística de daños.

Resultado: Conocimientos de los tipos de fallas estructurales típicas que se pueden presentar en los tanques de almacenamiento, derivados de eventos sísmicos.

Objetivo 4: Determinar la fiabilidad estructural ante acciones sísmicas del lugar, de los tanques de almacenamiento de crudo, aplicando el método de Monte Carlo (MMC).

Paso 1: Estimación de la amenaza sísmica en el sitio.

Paso 2: Establecer las consecuencias en términos de pérdidas de vidas humanas, impacto al ambiente y consecuencias económicas (directas o

indirectas) y lucro cesante, producto de la falla o mal funcionamiento de tanques de almacenamiento en caso de ocurrencia de sismos.

Paso 3: Modelar la acción sísmica a través de espectros esperado en el sitio de respuesta.

Paso 4: Construcción de un modelo matemático, que permita incorporar la geometría y pesos (masas), esfuerzos actuantes y admisibles de los tanques en estudio.

Paso 5: Definir las Variables Básicas (VB) que gobiernan el problema demanda/resistencia y caracterización probabilística de las Variables Básicas (VB) en Variables Aleatorias (VA).

Paso 6: Definir las funciones de falla.

Paso 7: Realizar las simulaciones matemáticas a través del Método de Nivel II, del Método de Monte Carlo (MMC).

Paso 8: Calcular la probabilidad de falla para cada tanque

Resultado: Calcular la fiabilidad estructural o su complemento la probabilidad de falla, ante acciones sísmicas, combinadas con las cargas operacionales, de los 13 tanques del Patio de Tanque el Tejero (PTT), ubicado en El Tejero, Estado Monagas y perteneciente a la Unidad de Exploración y Producción de PDVSA.

CAPITULO IV. DESARROLLO DE OBJETIVOS

En este capítulo se desarrollan y analizan los resultados obtenidos en cada uno de los objetivos establecidos en este Trabajo Final.

4.1. Tipos tanques de almacenamiento existentes en el PTT y su diseño estructural.

Los tanques de almacenamiento existentes en el PTT, están diseñados bajo la norma API 650 y están conformados por las siguientes partes:

Fondo

Fabricados con placas de acero de espesor menor al de la pared del tanque, dado que el peso del tanque es soportado por la base de concreto o fundación sobre la cual es construido, y no por el fondo que cumple más que todo una función de sello.

El fondo del tanque está conformado por placas traslapadas debido a que absorbe las deformaciones sufridas por el fondo y de una placa anular. Ésta última es un anillo plano circular y se utiliza para disminuir el efecto de la concentración de esfuerzos en la unión fondo-pared, así como para aumentar la resistencia en caso de un volcamiento causado por efectos sísmicos. El diámetro del fondo es mayor al diámetro externo de la pared.

Pared

La pared, unas de las partes más importantes ya que constituye todo lo que es el cuerpo del tanque y su estructura total, son de forma cilíndrica, conformada por seis anillos que están en función de la altura del tanque y de las planchas de acero. Dichos anillos varían en espesor, siendo el primer anillo el más macizo dado que soportará el peso de los demás anillos, del líquido almacenado y su efecto de empuje hidrostático y del techo, además de estar unido al fondo del tanque.

Techo

El techo tiene como objetivo proteger el líquido almacenado del contacto con el medio ambiente. Éstos pueden clasificarse según el tipo de su cubierta y se presenta a continuación:

- Techos fijos: Son utilizados para contener productos no volátiles o no inflamables. Tiene como característica que al disminuir el nivel del fluido almacenado, se forma una cámara de aire que facilita la evaporación del fluido, resultando esto muy peligroso. Los techos fijos pueden ser:

Cónicos: soportados y autosoportados,

Domo geodésico

- Techos flotantes: Se emplea para almacenar productos altamente volátiles como combustibles y alcoholes. Dado que este tipo de techo se desplaza según el nivel del fluido almacenado, se evita la formación de vapores ya que no existe el espacio que se forma entre el techo fijo y el fluido: reduciendo además pérdida del producto por evaporación. Los techos flotantes son de dos tipos:

Externo,

Interno

En el PTT solo existen tanques con techos flotantes, un techo tipo domo geodésico de aluminio más un techo flotante interno de aluminio y otros con techo flotante interno de aluminio sin domo.

En la Tabla 5 se listan los tanques analizados, condición de anclaje, geometría y producto almacenado y en las Figuras de la 8 a la 13, se muestran vistas generales de los tanques almacenamiento de crudo del PTT.

Tabla 5. Geometría y otras características de los tanques analizados

Tanque	Diámetro (m)	Altura (m)	Tipo de techo	Anclado	Producto almacenado
9751	36,58	15,83	Domo Geodésico fijo con interno flotante de aluminio	No	Crudo 30 ± 0.5° API
9752	36,58	16,25		No	
9754	36,58	15,86		No	
9755	36,58	16,33		No	
9756	36,58	15,57		No	
130001	42,67	16,28		No	
130002	42,67	16,50		No	
200001	55,17	18,23	Techo Flotante de Aluminio	No	Crudo 40.5 ± 0.5° API
200002	55,17	18,23		No	
200003	55,17	15,27		No	
250001	55,17	17,31		No	Crudo 30 ± 0.5° API
250002	60,96	17,60		No	
250003	60,96	15,94	Domo Geodésico fijo con interno flotante de aluminio	No	Crudo 30 ± 0.5° API
Material de las paredes de los tanques: Acero ASTM A36, $F_y = 2533 \text{ kgf/cm}^2$					

Fuente: Elaboración propia, datos Gerencia Coordinación Operacional PDVSA



Figura 7. Vista general del tanque 9751.

Fuente: Elaboración propia



Figura 8. Vista general del tanque 9752.

Fuente: Elaboración propia



Figura 9. Vista general del tanque 9754.

Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Vista general del tanque 9755.

Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Vista general del tanque 9756.

Fuente: Elaboración propia

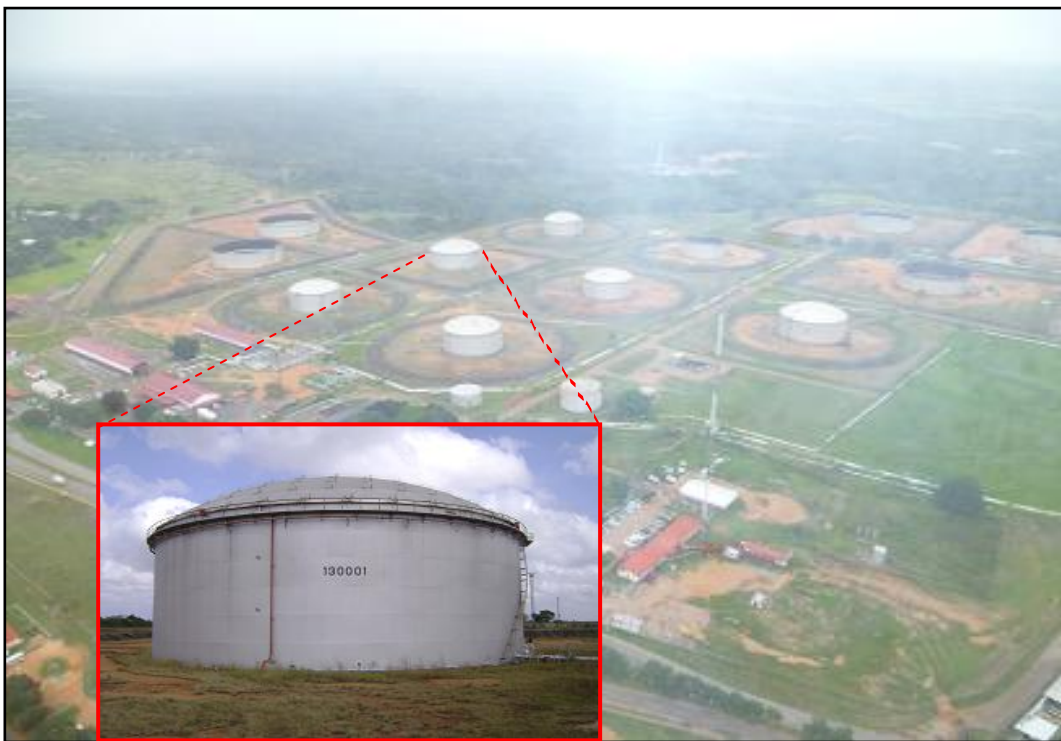


Figura 12. Vista general del tanque 130001.

Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Vista general del tanque 130002.

Fuente: Elaboración propia



Figura 14. Vista general del tanque 200001.

Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Vista general del tanque 200002.

Fuente: Elaboración propia



Figura 16. Vista general del tanque 200003.

Fuente: Elaboración propia



Figura 17. Vista general del tanque 250001.

Fuente: Elaboración propia



Figura 18. Vista general del tanque 250002.

Fuente: Elaboración propia

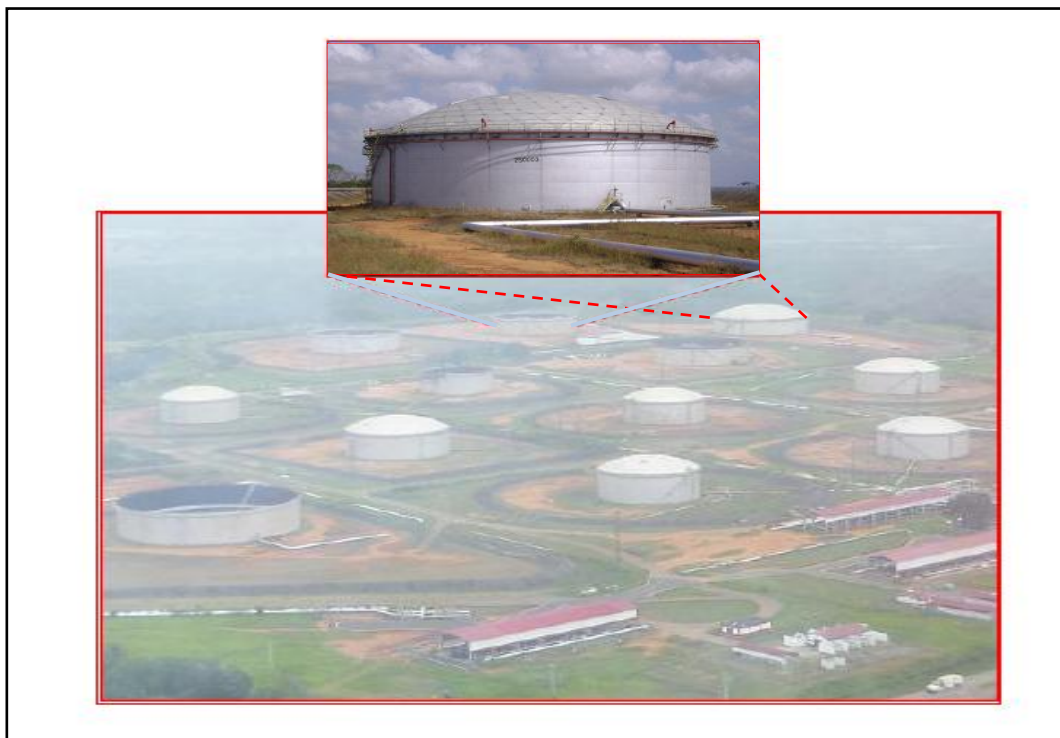


Figura 19. Vista general del tanque 250003.

Fuente: Elaboración propia

4.2. Condiciones actuales de los tanques mediante la medición de los espesores de paredes, placa anular y su sistema de anclajes, condiciones de operación y cualquier evento sobrellevado por los tanques (fuego, explosiones, asentamientos, entre otros).

Se presentan en las tablas 6 a la 18, los resultados de la inspección visual realizada en los tanques de estudio; levantada en campo junto al personal de la Gerencia Técnica de Mantenimiento de equipos estáticos de PDVSA, con la finalidad de evaluar la condición actual del equipo, recomendar las acciones preventiva/correctivas que se requieran para garantizar la integridad mecánica y la operación óptima y segura del mismo. Las mediciones de los espesores se realizaron con el equipo CHECK-LINEK, modelo TI-25DL con palpador de $\frac{1}{4}$ " de 7,5Mhz.

Tabla 6. Inspección visual tanque 9751

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	Deterioro del Friso ligeramente desprendido en todo perímetro del anillo.		
Bocas de visitas	Se observó uno (01) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee uno (01) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron 04” conectadas al sistema de efluente.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con dos descansos intermedios. De 0.65 mts de ancho y con reducción en la parte superior a 0.30mts La pintura se encuentra ligeramente manchada por él oxido presente en el agua utilizada durante las pruebas del sistema contra incendios.		
Paredes y pintura externa	Posee Seis anillos en buen estado, pintura de las paredes en buenas condiciones.		
Espesores	1er anillo: 18,65 mm. 2do anillo: 16,52 mm.	3er anillo: 13,97mm. 4to anillo: 10,77 mm.	5to anillo: 6,39 mm. 6to anillo: 5,98 mm.
Sistema de Automatización:	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
Baranda perimetral:	Se observó en buen estado.		
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas aluminio)</u>			
Pontones	Por diseño y seguridad no hay acceso a los mismos, ya que están sumergidos en el crudo.		
Sello mecánico (tipo tijera)	Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso para verificar el estado del mismo.		
Cubierta principal del techo	Totalmente plana y limpia.		
Pintura	En buen estado.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	Se observa caja de medición con tres cables conectados a la misma, y cinco cables conectados a la estructura del tanque. Sin embargo se encuentra fuera de servicio.		
Sistema de puesta a tierra	Se observaron dos cables. Revisar el sistema puesta a tierra 1 conectado y 1 desconectado.		
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Inspección visual: tanque 9752

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	Ligeramente agrietados en los bordes y parte superior del Friso, donde presenta la salida de agua en el fondo la cual se presume que el fondo presente Ruptura.		
Bocas de visitas	Se observó uno (01) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee dos (02) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron cuatro (04) boquillas roscadas Conectadas a la estructura de efluente.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con un descanso Intermedio. La pintura esta ligeramente manchada por el oxido presente en el agua utilizada durante las pruebas del sistema contra incendios		
Paredes y pintura externa	Posee Seis anillos en buen estado, pintura de las paredes ligeramente manchadas por efecto del óxido contenido en el agua utilizada en las pruebas del Sistema Contra Incendios.		
Espesores:	1er anillo: 14,66mm 2do anillo: 14,30mm	3er anillo: 11,98mm 4to anillo: 8,58mm	5to anillo: 5,01mm 6to anillo: 4,83mm
Baranda perimetral	Se observó en buen estado.		
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas de Aluminio)</u>	Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso a los mismos, ya que están sumergidos en el crudo.		
Pontones			
Sello mecánico (tipo tijera)	Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso para verificar el estado del mismo.		
Cubierta principal del techo	Totalmente plana y limpia.		
Pintura	En buen estado.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y disipador de espuma. En buen estado		
Sistema de protección catódica	Se observa caja de medición con tres cables conectados a la misma la cual dos cables conectados a la estructura del tanque. No se observó caja para mediciones de potenciales. Fuera de servicio.		
Sistema de puesta a tierra	Se observó un cable calibre #2 conectado a la estructura del tanque, visualmente en buen estado.		
Sistema de disipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Inspección visual tanque 9754

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto:	Ligeramente agrietado con desprendimiento de capa de cemento pobre y semienterrado un 40%		
Bocas de visitas:	Se observó uno (01) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee uno (01) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron 04 boquillas con bridas de Ø04" conectadas al sistema de efluente.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con un descanso intermedio. La pintura se está ligeramente manchada por oxido presente en el agua utilizada durante pruebas del sistema contra incendios.		
Paredes y pintura externa	Posee Seis anillos en buen estado, ligeramente manchada por él oxido presente en el agua utilizada durante las pruebas del sistema contra incendios.		
Espesores	1er anillo: 16,02 mm. 2do anillo: 11,49 mm.	3er anillo: 9,78 mm. 4to anillo: 8,07 mm.	5to anillo: 5,60 mm. 6to anillo: 5,30 mm.
Baranda perimetral:	Se observó en buen estado.		
Sistema de Automatización:	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
<u>TECHO FLOTANTE</u> (Láminas de aluminio)			
Pontones	Por diseño y seguridad no hay acceso a los mismos, ya que están sumergidos en el crudo.		
Sello mecánico (tipo tijera)	Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso para verificar el estado del mismo.		
Cubierta principal del techo	Totalmente plana y limpia.		
Pintura	En buen estado.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y disipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	Se observa cables conectados a la estructura del tanque, cuenta con caja de medición de potenciales con cuatro (04) cables que salen debajo de las láminas del piso.		
Sistema de puesta a tierra	Se observaron tres (03) cables calibre #2, las cuales dos (02) están conectados a la estructura del tanque y uno (01) se encuentra desconectado.		
Sistema de disipador de atmósferas (DAS)	Se observó en buen estado.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Inspección visual: tanque 9755

ESTRUCTURA DEL TANQUE		RESULTADOS			
Condiciones anillo de concreto		Deterioro del Friso agrietado en todo el perímetro del anillo.			
Bocas de visitas		Se observó uno (01) en buen estado.			
Bocas de limpiezas		Posee uno (01) en buen estado.			
Sistema de drenaje de agua salada		Se observaron cuatro (04) boquillas Ø4" a una altura de 5" de la lámina del piso, 2 con bridas soldables y 2 roscadas, todas conectadas al sistema de efluente. Visualmente en buen estado.			
Escalera externa		Se observa en buen estado, con un (01) descanso intermedio. La pintura esta ligeramente manchada por el oxido presente en el agua utilizada durante las pruebas del sistema contra incendios.			
Paredes y pintura externa		Posee Siete anillos en buen estado, pintura de las paredes en buenas condiciones.			
Espesores		1er anillo: 20,04 mm 2do anillo: 16,84 mm	3er anillo: 13,94 mm 4to anillo: 9,82 mm	5to anillo: 6,83 mm 6to anillo: 5,84 mm	
Sistema de Automatización		Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.			
Baranda perimetral		Se observó en buen estado.			
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas de aluminio)</u>		Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso a los mismos, ya que están sumergidos en el crudo.			
Pontones		Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso para verificar el estado del mismo.			
Sello mecánico (tipo tijera)		Totalmente plana y limpia.			
Cubierta principal del techo		En buen estado.			
Pintura					
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>					
Sistema contra incendio		Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado			
Sistema de protección catódica		Se observa caja de medición con tres cables conectados a la misma, y cinco cables conectados a la estructura del tanque. La cual se encuentra fuera de servicio.			
Sistema de puesta a tierra		Se observaron dos cables. Revisar el sistema puesta a tierra 1 conectado y 1 desconectado.			
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)		Se observó en buen estado.			
<u>CONDICIONES GENERALES</u>					
Maleza		Abundante.			
Muro de protección del tanque		Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Inspección visual tanque 9756

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	Ligeramente agrietado en el borde.		
Bocas de visitas	Se observa 01 (uno) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee 02 (dos) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron 04 (cuatro) boquillas Ø 04" roscada a la pared del tanque. En buen estado.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con un (01) descanso intermedio.		
Condiciones de las paredes y pintura externa	Se observaron deformaciones considerables en las láminas del 4° y 5° anillo.		
Espesores:	1er anillo: 18,23 mm 2do anillo: 14,80 mm	3er anillo: 11,01 mm 4to anillo: 5,77 mm	5to anillo: 4,74 mm 6to anillo: 4,32 mm
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal. (hurto)		
Baranda perimetral	Se observó en buen estado.		
<u>TECHO FLOTANTE</u> (Láminas de aluminio)	Por falta de escalera, no se realizó la inspección del techo. En general se observa desde el borde superior con deformaciones considerables en el 70% de toda su área.		
Pontones	No hay acceso por falta de escalera.		
Sello mecánico (tipo tijera)	No hay acceso por falta de escalera.		
Cubierta principal del techo	Totalmente plana y limpia.		
Pintura	No hay acceso por falta de escalera.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma, deben inspeccionarse.		
Sistema de protección catódica	No se observaron cables conectados a la estructura del tanque, solo dos (02) cajas de medición deteriorada. Sin embargo se encuentra fuera de servicio.		
Sistema de puesta a tierra	Se observó un cable calibre #2 conectado a la estructura del tanque.		
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado físico.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto la cual se encuentra en buen estado		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Inspección visual tanque 130001

ESTRUCTURA DEL TANQUE		RESULTADOS	
Condiciones anillo de concreto		Se observa semienterrado en un 20%.	
Bocas de visitas		Se observó uno (01) en buen estado.	
Bocas de limpiezas		Posee uno (01) en buen estado.	
Sistema de drenaje de agua salada		Se observaron 04" conectadas al sistema de efluente. En buen estado.	
Escalera externa		Se observa en buen estado, con dos descansos intermedios. De 0.65 mts de ancho y con reducción en la parte superior a 0.30 mts. Por la pestaña del techo de domo. La pintura se encuentra ligeramente manchada por oxido presente en el agua utilizada durante las pruebas del sistema contra incendios.	
Condiciones de las paredes y pintura externa		Posee Seis anillos en buen estado, pintura de las paredes en buen estado	
Espesores :		1er anillo: 23,32 mm 2do anillo: 19,20 mm	3er anillo: 15,08 mm. 4to anillo: 10,07 mm 5to anillo: 7,30 mm 6to anillo: 4,06 mm
Baranda perimetral:		Se observó en buen estado.	
Sistema de Automatización:		Fuera de servicio por falta de cable de potencia principal.	
<i>TECHO FLOTANTE (láminas de aluminio)</i>			
Pontones		Por diseño y seguridad no hay acceso a los mismos, ya que están sumergidos en el crudo.	
Sello mecánico (tipo tijera):		Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso para verificar el estado del mismo.	
Cubierta principal del techo		Totalmente plana y limpia.	
Pintura		En buen estado.	
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio		Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado.	
Sistema de protección catódica		Se observa tres cables conectados a la estructura del tanque, sin embargo se encuentra fuera de servicio.	
Sistema de puesta a tierra		Se verificó un cable #2 conectado a la estructura del tanque.	
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)		Se observó en buen estado.	
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza		Abundante.	
Muro de protección del tanque		Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Inspección visual tanque 130002

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	En buen estado.		
Bocas de visitas	Se observó 01 (uno) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee 01 (uno) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	En buen estado, con cuatro boquillas con bridas soldables Ø 04" conectadas al sistema de efluente.		
Escalera externa	Buen estado, con 2 descansos intermedios de 0.65mts de ancho, con reducción en la parte superior a 0.30mts por la pestaña del techo del domo. La pintura se encuentra ligeramente manchada por el óxido presente en el agua utilizada durante las pruebas del sistema contra incendios		
Paredes y pintura externa	Con seis anillos, ligeramente manchadas por efecto del oxido contenido en el agua utilizada en las pruebas del sistema contra incendios		
Espesores:	1er anillo: 23,56 mm 2do anillo: 15,43 mm	3er anillo: 14,02 mm 4to anillo: 7,72 mm	5to anillo: 5,48 mm 6to anillo: 5,48 mm
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
Baranda perimetral	Se observó en buen estado.		
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas de aluminio)</u>			
Pontones	Por diseño y seguridad no hay acceso a los mismos, ya que están sumergidos en el crudo.		
Sello mecánico (tipo tijera)	Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso para verificar el estado del mismo.		
Cubierta principal del techo	Totalmente plana y limpia.		
Pintura	En buen estado físico.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y disipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	Se observaron tres puntos, dos conectados. Fuera de Servicio.		
Sistema de puesta a tierra	Se observaron cuatro cables calibre #2 todos conectados a la estructura del tanque. Sin embargo sistema de aterramiento se encuentra fuera de servicio (fue desmantelada).		
Sistema de disipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado físico.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto la cual se encuentra en buen estado.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Inspección visual tanque 200001

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	En buen estado.		
Bocas de visitas	Se observaron 03 (tres) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee 01 (uno) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron 03 (tres) boquillas con bridas soldables Ø 06" conectadas al sistema de efluente. Presenta parches en la extensión de la línea.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con dos descansos intermedios.		
Paredes y pintura externa	Las paredes están en buen estado con seis anillos, la pintura ligeramente manchadas por efecto del óxido contenido en el agua utilizada en las pruebas del sistema contra incendios		
Espesores:	1er anillo: 31,06 mm 2do anillo: 28,85 mm	3er anillo: 21,03 mm 4to anillo: 14,94 mm	5to anillo: 9,83 mm 6to anillo: 7,92 mm
Baranda perimetral	Se observó en buen estado.		
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
<u>TECHO FLOTANTE</u> (Láminas de aluminio)			
Pontones	Se observaron todo sus compartimientos limpios con 27 patas y 28 bocas de visita.		
Sello mecánico (tipo tijera):	En buen estado.		
Pintura	Ligeramente manchada por efectos atmosféricos		
Soportes o patas.	Se observaron nivelados 98 patas		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	Fuera de servicio con todos los cables conectados a la estructura del tanque.		
Sistema de puesta a tierra	Se observaron tres (03) cables calibre #2 todos conectados a la estructura del tanque		
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado físico.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza:	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto la cual se encuentra en buen estado		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Inspección visual tanque 200002

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	Se observa en buen estado.		
Bocas de visitas	Se observaron 03 (tres) en buen estado.		
Bocas de limpieza	Posee 01 (uno) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron 03 (tres) boquillas con bridas soldables Ø06" conectadas al sistema de efluentes. Visualmente en buen estado.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con 01 (uno) descanso intermedio.		
Paredes y pintura externa	Visualmente las paredes están en buen estado con seis anillos, ligeramente manchadas por efectos atmosféricos.		
Espesores:	1er anillo: 26,11 mm 2do anillo: 22,00 mm	3er anillo: 15,95 mm 4to anillo: 11,89 mm	5to anillo: 7,87 mm 6to anillo: 7,77 mm.
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
Baranda perimetral	Se observó en buen estado.		
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas aluminio)</u>			
Pontones	Se observó uno de sus compartimientos con crudo.		
Sello mecánico (tipo tijera)	En buen estado.		
Pintura	Ligeramente manchada por efectos atmosféricos		
Soportes o patas	Se observaron nivelados con 71 patas.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	Se observaron todos los cables conectados a la estructura del tanque. Fuera de servicio.		
Sistema de puesta a tierra	Se observaron tres (03) cables calibre #2 todos conectados a la estructura del tanque.		
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado físico.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto la cual se encuentra en buen estado físico.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Inspección visual tanque 200003

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	Se observó en buen estado.		
Bocas de visitas	Se observaron tres (03) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee uno (01) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron tres (03) boquillas con brida soldable Ø 6" conectadas al sistema de efluente.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con un (01) descanso intermedio.		
Paredes y pintura externa	Posee Seis anillos con deformaciones en los dos últimos, y deterioro de la pintura.		
Espesores :	1er anillo: 25,96 mm 2do anillo: 22,33 mm	3er anillo: 15,77 mm 4to anillo: 12,19 mm	5to anillo: 8,03 mm 6to anillo: 7,92 mm
Baranda perimetral	Se observó en buen estado.		
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas de aluminio)</u>			
Pontones:	No se revisaron.		
Sello mecánico (tipo tijera):	Destruído en un 70% a causa del incendio.		
Pintura	Desprendida en la parte superior, y manchada en el resto del cuerpo.		
Soportes o patas	Se observan niveladas, deber ser evaluada internamente.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	No se observa ningún cable conectado ala estructura del tanque.		
Sistema de puesta a tierra:	Se observó dos cables conectado a la estructura del tanque.		
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante.		
Muro de protección del tanque	Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Inspección visual tanque 250001

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	Se observó en buen estado.		
Bocas de visitas	Se observaron cuatro (04) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee dos (02) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Se observaron 05 boquillas de Ø 4" con bridas todas conectadas al sistema de efluentes.		
Escalera externa	Se observa en buen estado, con un descanso intermedios.		
Paredes y pintura externa	Posee Seis anillos en buen estado, pintura de las paredes ligeramente manchadas por efectos atmosféricos.		
Espesores:	1er anillo: 27,78 mm 2do anillo: 23,97 mm	3er anillo: 19,38 mm 4to anillo: 16,02 mm	5to anillo: 10,00 mm 6to anillo: 9,83 mm
Baranda perimetral	Se observó en buen estado.		
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
<u>TECHO FLOTANTE (láminas de acero)</u>			
Pontones	Se observa unos de sus compartimentos manchado por crudo.		
Sello mecánico (tipo tijera)	Presenta deformación en varios puntos en el sello secundario.		
Pintura	Manchada por efectos atmosféricos.		
Soportes o patas	Se observaron niveladas.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	Se observaron dos cables conectados a la estructura del tanque sin la caja de medición de potenciales, sin embargo se encuentra fuera de servicio.		
Sistema de puesta a tierra	Se observaron cuatro cables calibre 2.0 conectados a la estructura del tanque.		
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Maleza	Abundante		
Muro de protección del tanque	Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Inspección visual tanque 250002

ESTRUCTURA DEL TANQUE	RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto	Se observó en buen estado.		
Bocas de visitas	Se observaron cuatro (04) en buen estado.		
Bocas de limpiezas	Posee dos (02) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada	Visualmente en buen estado cuatro (04) boquillas Ø4" conectadas al sistema de efluente.		
Escalera externa	Buen estado, con un (01) descanso intermedio. La pintura está ligeramente manchada por el óxido presente en el agua utilizada durante las pruebas del sistema contra incendios		
Paredes y pintura externa	Posee Seis anillos en buen estado, pintura de las paredes en buenas condiciones.		
Espesores	1er anillo: 28,09 mm 2do anillo: 25,15 mm	3er anillo: 19,58 mm 4to anillo: 16,51 mm	5to anillo: 10,16 mm 6to anillo: 10,06 mm
Baranda perimetral:	Se observó en buen estado.		
Sistema de Automatización	Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas de acero)</u>			
Pontones	Se observó unos de sus compartimientos manchados con crudo.		
Sello mecánico (tipo tijera)	Presenta deformación en varios puntos del sello secundario.		
Pintura	Ligeramente manchada por efectos atmosféricos.		
Drenaje interno del techo	Se presume sea pivote master con válvula de compuerta en la salida Ø 6". Se visualiza en buen estado.		
Soportes o patas	Se observaron nivelados con 71 patas.		
<u>SISTEMA DE PROTECCIÓN</u>			
Sistema contra incendio	Tiene refrescamiento de paredes externas y dissipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica	Cables conectados a la estructura del tanque, con sus cajas para medición de potencial.		
Sistema de puesta a tierra	Se observaron tres cables calibre 2.0 conectados a la estructura del tanque. Sin embargo sistema de aterramiento se encuentra fuera de servicio (fue desmantelada).		
Sistema de dissipador de atmósferas: (DAS)	Se observó en buen estado.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>			
Muro de protección del tanque	Desprendimiento del concreto del muro de contención..		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Inspección visual tanque 250003

ESTRUCTURA DEL TANQUE		RESULTADOS		
Condiciones anillo de concreto		Se observaron en buenas condiciones.		
Bocas de visitas		Se observaron cuatro (04) en buen estado.		
Bocas de limpiezas		Posee dos (02) en buen estado.		
Sistema de drenaje de agua salada		Se observaron seis (06) bridados Ø 4" todos conectadas a efluentes.		
Escalera externa		Se observó en buen estado.		
Condiciones de las paredes y pintura externa		Posee Seis anillos en buen estado, pintura de las paredes en buenas condiciones		
Espesores		1er anillo: 25,96 mm 2do anillo: 22,33 mm	3er anillo: 15,77 mm 4to anillo: 12,19 mm	5to anillo: 8,03 mm 6to anillo: 7,92 mm
Baranda perimetral		Se observo en buen estado.		
Sistema de Automatización		Fuera de servicio por falta del cable de potencia principal.		
<u>TECHO FLOTANTE (Láminas de aluminio)</u>				
Pontones		Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso a los mismos, ya que están sumergidos en el crudo.		
Sello mecánico (tipo tijera)		Por condiciones de diseño y seguridad no hay acceso para verificar el estado del mismo.		
Cubierta principal del techo		Totalmente plana y limpia.		
Pintura		En buen estado.		
<u>SISTEMA DE PROTECCION</u>				
Sistema contra incendio		Tiene refrescamiento de paredes externas y disipador de espuma. Buen estado.		
Sistema de protección catódica		Se observan cinco cables conectados y dos cajas de medición de potencias, sin embargo se encuentra fuera de servicio.		
Sistema de puesta a tierra		Se observaron cinco cables calibre #2 con cuatro conectados y la ausencia de uno de ellos		
Sistema de disipador de atmósferas: (DAS)		No tiene.		
<u>CONDICIONES GENERALES</u>				
Maleza		Abundante.		
Muro de protección del tanque		Es de concreto, actualmente se encuentra en buen estado.		

Fuente: Elaboración propia

4.3. Tipos de fallas estructurales típicas que se pueden presentar en los tanques de almacenamiento, derivados de eventos sísmicos pasados.

A partir de la revisión documental del lugar observacional, Manzanares (2013), señala que de acuerdo con experiencias recientes del comportamiento sismorresistente de tanques en sismos pasados, como por ejemplo los ocurridos en la Provincia de El Limón, Costa Rica el 22-04-1991, en Korfez, Turquía el 17-08-1999 y en Miyagi, Japón del 11-03-2011 y sus daños: derrame, incendio, explosión, pandeo inelástico por excedencia de los esfuerzos de compresión admisibles, desgarramiento por esfuerzos de tracción, succión interna, deformación de la pared del tanque, se ha podido observar las fallas típicas de estos equipos, derivándose los estados de daños típicos. En la Tabla 19, se listan estos estados de daños.

Tabla 19. Estados de daños por sismos en tanques de almacenamiento

Estado de daños	Descripción del daño	Fotografía referencial
1	Pandeo elastoplástico de las paredes del tanque (pata de elefante)	
2	En tanques esbeltos, con relación H/D cercana o mayor de 2, se ha observado pandeo elástico en forma de diamante	
3	Rotura de la soldadura que une la plancha base con el primer anillo	
4	El oleaje interno del tanque ha dañado techos, sea fijos o flotantes	
5	Tanques no anclados sufren levantamientos parciales de su base, e incluso traslaciones, afectando tuberías que se encuentran rígidamente conectadas al cuerpo del tanque y ha causado derrames	

Estado de daños	Descripción del daño	Fotografía referencial
6	En el caso de tanques anclados, su comportamiento ha sido inadecuado cuando los anclajes están mal diseñados. Conexiones no dúctiles pueden dar lugar a fallas frágiles, locales, con pérdida del contenido	
7	Problemas de inestabilidad de taludes, licuefacción asentamientos diferenciales, insuficiente capacidad portante o erosión localizada del suelo de fundación	
8	Fuego post-sismo	

Fuente: Informe técnico No. 14-IM-IT-021, (2004, p. 34)

4.4. Determinación la fiabilidad estructural ante acciones sísmicas del lugar, de los tanques de almacenamiento de crudo, aplicando el método de Monte Carlo (MMC).

4.4.1. Estimación de la amenaza sísmica y consecuencias en términos de pérdidas de vidas humanas, impacto al ambiente y consecuencias económicas (directas o indirectas) en el sitio.

La amenaza sísmica se expresa en términos de la aceleración horizontal y vertical máximas esperadas en el sitio de interés para un periodo de retorno y una probabilidad de excedencia anual estimada a partir de la probabilidad de excedencia anual, p_1 . Para lograr este objetivo se aplicaron las ecuaciones y mapas de peligro sísmico indicados en PDVSA JA-221, 2014. Estos mapas permiten para cada sitio de interés determinar el valor de aceleración, con base en la mejor información tectónica y sismicidad disponibles y considerando diferentes períodos de retorno y vidas útiles. En este particular PDVSA JA-221, se diferencia de la formulación clásica de otros códigos de diseño, basados en un período medio de retorno y probabilidad de excedencias anuales fijas, típicamente 450 años y 10%, respectivamente.

A los efectos de esta evaluación y para el sitio de ubicación del PTT, le corresponden los siguientes valores de peligro sísmico, $a^*=55,0 \text{ cm/s}^2$ y $\gamma=4,25$. La aceleración horizontal máxima del terreno, a , en cm/s^2 , se obtiene a partir de la Ecuación (6) y la aceleración horizontal máxima del terreno, A_0 , expresada como una fracción de la aceleración de gravedad, g , se calcula como se indica en la Ecuación (7).

Se adoptó un grado de riesgo D y una probabilidad anual de excedencia, $p_1=0,0001$, el más elevado tomando en cuenta las graves consecuencias humanas, ambientales y económicas derivadas por falla o colapso de estos equipos, en caso de ocurrencia de un sismo severo, de acuerdo con la Tabla 1 de Norma técnica PDVSA JA-221, la cual se presenta en esta investigación como la Tabla 2. La aceleración horizontal máxima del terreno, a , resulta entonces igual a $480,32 \text{ cm/s}^2$. Es decir $A_0=0,49g$, expresada como fracción de la aceleración de gravedad y consecuentemente $A_v=0,34g$, igual a 0,70 veces la aceleración horizontal máxima del terreno. En la Tabla 20 se muestran los datos usados y calculados para la amenaza sísmica del lugar estudiado.

Tabla 20. Data de la amenaza sísmica del lugar de estudio.

Perfil del suelo	S3
Grado de riesgo	D
p_1	0,0001
a^*	55
Gamma, γ :	4,25
$a \text{ (cm/s}^2\text{)}$	480,32
$A_0 \text{ (g)}$	0,49
$A_v \text{ (g)}$	0,34

4.4.2. Modelaje la acción sísmica a través de espectros esperados en el sitio de respuesta.

La fuerza o acción sísmica se modela a través de espectros de respuesta suavizados o alisados prescritos en PDVSA JA-221, 2014. Esta es una estrategia ampliamente aceptada y prescrita en códigos de diseño sismorresistente, que permiten incorporar la sismicidad en el sitio de interés, expresada en función de la aceleración horizontal y vertical esperada del terreno, los efectos locales del tipo de suelo o terreno de fundación, la importancia de la estructura, el amortiguamiento estructural, responsable de la disipación de la energía que induce el sismo, las consecuencias en términos de pérdida de vidas humanas, pérdidas económicas directas y lucro cesante y el impacto ambiental.

Considerando que el terreno sobre el cual se asientan los tanques analizados, según estudio de suelo realizado en el lugar y de acuerdo con la Tabla 3 de la Norma técnica PDVSA JA-221, califica como una forma espectral tipificada como S3, , con un factor de corrección del coeficiente de aceleración horizontal, $\phi=1,00$, y los parámetros del suelo $\beta=2,8$; $T^o=0,30$ s y $T^*=1,20$ s.

El factor de amplificación espectral, β^* , depende a su vez del factor de amortiguamiento, ζ , el cual incorpora las diversas formas de disipación de energía del sistema tanque-líquido-suelo y viene dado por la Ecuación (9).

Los valores del factor de amortiguamiento, ζ , están dados en la Norma Técnica PDVSA FJ-251 y se reproducen en la Tabla 4.

Los valores del factor de amplificación espectral, β^* , para una forma espectral del tipo S3 en tanques no anclados, resultan iguales a 1,81 y 2,38, para los efectos impulsivos (direcciones horizontal y vertical, respectivamente) y 4,87 para los efectos convectivos.

En la Figura 21 se muestran los espectros de diseño para tanques no anclados, empleados en esta evaluación.

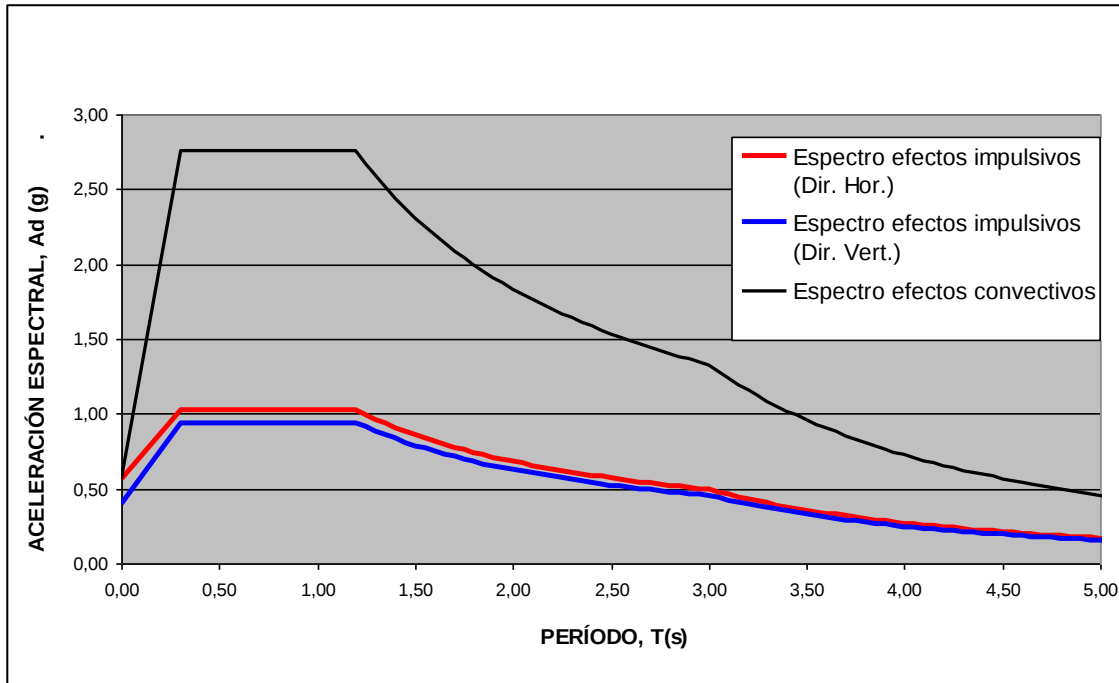


Figura 20. Espectros de diseño para tanques no anclados.

Fuente: Elaboración propia

Establecida la acción sísmica, se determinaron la fuerza cortante y el momento flector en la base del tanque, según las ecuaciones y de acuerdo con el modelo indicado en PDVSA FJ-251, 2014 y como se indican en el apartado 2.2.3 de esta investigación, junto con los datos recogidos de los tanques de almacenamiento, resumidos en el anexo A.

4.4.3. Funciones de falla

De la aplicación del instrumento de medición y la experiencia de otros eventos, se establecieron los estados de daño y se derivan entonces las funciones de falla. Los principales problemas en estructuras de pared o concha delgada, en presencia de fuerzas sísmicas, se asocian al pandeo elastoplástico bajo esfuerzos excesivos de compresión y excedencia del esfuerzo cedente del material en tensión y en particular en el primer anillo. Desde luego existen otros tipos de daños que responden más a debilidades en el diseño, fallas de soldaduras, mala calidad de la construcción, entre otros. La correcta selección del tipo de comportamiento estructural en los procedimientos basados en el cálculo estático

no lineal es fundamental, sobre todo en aquellos estados de daño donde la estructura presenta degradación como es el caso del estado de daño mayor.

Las funciones de falla se establecen, al relacionar “la demanda” y “la resistencia” estructural, con base en los esfuerzos admisibles y actuantes en el primer anillo de la pared del tanque, tanto en compresión como en tracción, producto de las cargas hidrostáticas, las gravitatorias y sísmicas, considerando los efectos impulsivos y convectivos para la componentes horizontal y vertical del sismo y relacionando las cinco variables básicas. El sistema falla cuando los esfuerzos actuantes exceden a los admisibles.

Las funciones de falla para los esfuerzos de compresión, FF_c , y tracción, FF_t , en el anillo inferior o primer anillo de la pared del tanque, vienen dadas por las Ecuaciones (52) y (53), respectivamente.

$$FF_c = F_a - f_c \quad (Ec\ 52)$$

$$FF_t = 1,33S_d - \sigma \quad (Ec\ 53)$$

4.4.4. Variables aleatorias consideradas

La determinación de la fiabilidad de un sistema estructural, depende en buena medida de la adecuada consideración de las incertidumbres que afectan a las Variables Aleatorias (VA) de las Variables Básicas (VB), que controlan la respuesta del sistema estructural y la correcta caracterización estadística y probabilística de estas variables. En la Tabla 21 se presenta el valor medio (media) y desviación estándar de las VB consideradas. En las Figuras 22, 23 y 24, para tanques no anclados, se muestran, de una manera general, los espectros medios con desviación estándar, tanto para los efectos impulsivos (dirección horizontal y vertical) y convectivos.

La selección de las VB obedeció a un cuidadoso análisis del comportamiento de tanques ante acciones sísmicas en sismos pasados. A los efectos de esta evaluación se consideraron a la altura de llenado del tanque (H_L), la acción sísmica (Ad_1 , Ad_2 y Adv) y la resistencia del material (S_d), como las variables

aleatorias que gobiernan el problema. El resto de las variables, tales como la gravedad específica, diámetro nominal del tanque, temperatura, entre otras; se consideran deterministas o básicas. En total se consideran cinco VB con distribución normal.

La altura de llenado del tanque (H_L) y la calidad del material (S_d) se caracterizaron como variables normales, mientras que la acción sísmica (Ad_1 , Ad_2 y Adv) quedaron caracterizadas con una distribución logarítmica normal.

Para la altura de llenado, se toma el valor de H_L , como valor medio y una desviación estándar del 10%. El valor de la tensión admisible del material del tanque se asume igual al indicado en las Tablas 5-2a y 5-2b de la Norma API 650, con un coeficiente de variación del 10% y para los valores medios de aceleración las ordenadas espectrales correspondientes a cada periodo de vibración, con un coeficiente de variación del 20%.

El levantamiento de la información interés y de los espesores de láminas de pared y plancha anular fueron medidos por personal de la Gerencia Técnica de Mantenimiento de equipos estáticos en jornadas de campo realizadas en el año de 2017 y se resumen en el Anexo A.

Tabla 21. Valores medios y desviación estándar de las Variables Básicas (VB)

Variables aleatorias	Tanque	Valor medio	Desviación Estándar
H_L (m)	9751, 9752, 9754, 9755, 9756	13,11	0,10 H_L (m)
	130001 y 130002	13,11	
	200001 al 200003	12,19	
	250001 al 250003	12,19	
S_d (kgf/cm ²) ^(a)	Todos	1631	163,10 ^(b)
Ad_1 (g) ^(c) Ad_2 (g) ^(c) Adv (g) ^(c)	9751, 9752, 9754, 9755, 9756	0,770	0,154
		0,205	0,041
		0,738	0,148
	130001 y 130002	0,855	0,171
		0,110	0,022
		0,870	0,174
	200001 al 200003	0,829	0,166
		0,069	0,014
		0,833	0,167
	250001 al 250003	0,829	0,166
		0,069	0,014
		0,833	0,167

(a) Los tanques fueron contruidos con un acero tipo ASTM A-36.

(b) Para un coeficiente de variación, CV del 10%.

(c) Para un coeficiente de variación, CV del 20%.

Fuente: Elaboración propia

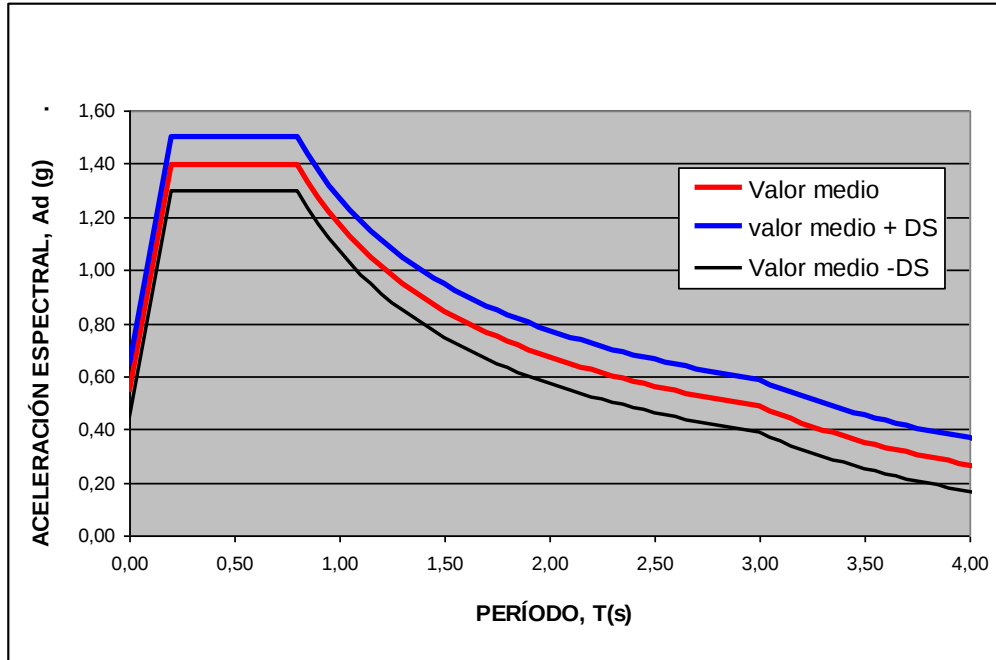


Figura 21. Espectros de respuesta elástica medio $\pm$ desviación estándar – Efectos impulsivos (Dirección horizontal). Tanques no anclados.

Fuente: Elaboración propia

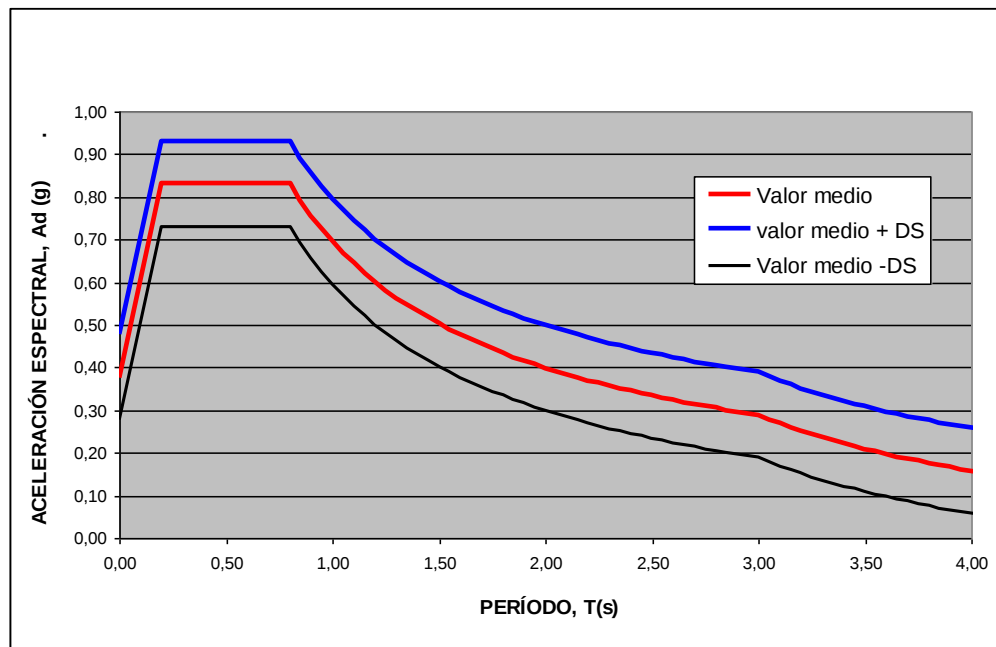


Figura 22. Espectros de respuesta elástica medio $\pm$ desviación estándar – Efectos impulsivos (Dirección vertical). Tanques no anclados.

Fuente: Elaboración propia

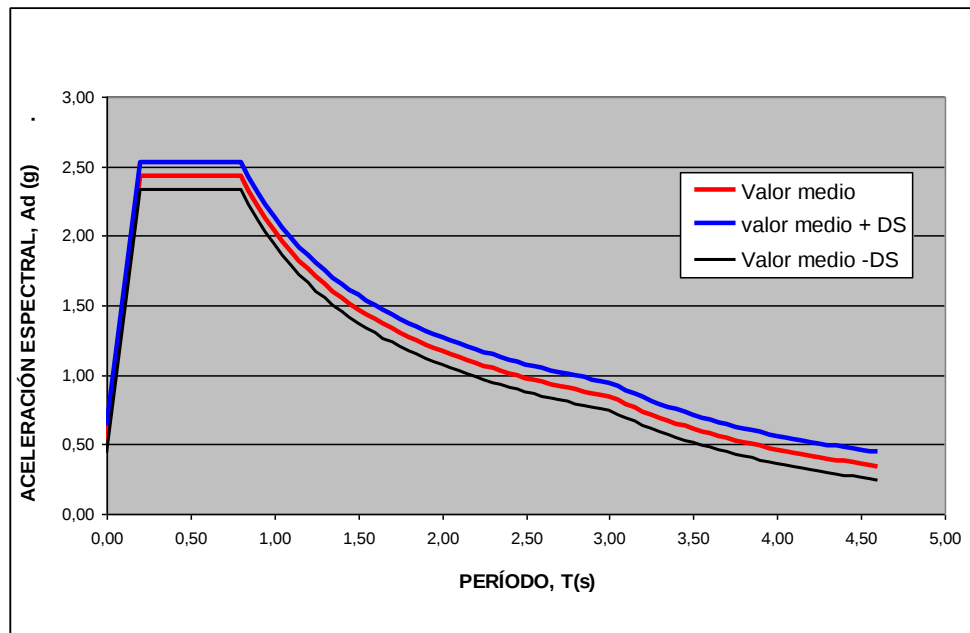


Figura 23. Espectros de respuesta elástica medio $\pm$ desviación estándar – Efectos convectivos.

Tanques no anclados.

Fuente: Elaboración propia

4.4.5. Simulaciones matemáticas a través del Método de Nivel II, del Método de Monte Carlo (MMC).

Los métodos de simulación se basan en muchas repeticiones del “experimento”. Es decir someter al modelo matemático, a los diferentes valores de las VA, estimar las fuerzas en la base del tanque y comparar para cada caso, los esfuerzos actuantes con los admisibles del material de fabricación.

Se realizaron 65000 simulaciones, en Microsoft Excel, para la implantación del Método de Monte Carlo (MMC), se generaron 65000 valores aleatorios para combinar cada una de las VB consideradas. En la Tabla 22 se resumen los resultados obtenidos y en el anexo B se muestran los resultados de las simulaciones para todos los tanques.

Tabla 22. Resultados de probabilidad de falla y fiabilidad aplicando el MMC

Tanque	Fiabilidad	Compresión FFc < 0	Tracción FFt < 0	Falla conjunta FFc < 0 y/o FFt < 0
9751	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	99,79	100	99,79
	Prob. de falla, P_f (%)	0,21	0	0,21
9752	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	99,96	99,95	99,91
	Prob. de falla, P_f (%)	0,04	0,05	0,09
9754	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	99,97	100	99,97
	Prob. de falla, P_f (%)	0,03	0	0,03
9755	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	99,82	100	99,82
	Prob. de falla, P_f (%)	0,18	0	0,18
9756	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	99,98	100	99,98
	Prob. de falla, P_f (%)	0,02	0	0,02
130001	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	98,74	100	98,74
	Prob. de falla, P_f (%)	1,26	0	1,26
130002	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	99,01	100	99,01
	Prob. de falla, P_f (%)	0,99	0	0,99
200001	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	100	100	100
	Prob. de falla, P_f (%)	0	0	0
200002	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	100	100	100
	Prob. de falla, P_f (%)	0	0	0
200003	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	100	100	100
	Prob. de falla, P_f (%)	0	0	0
250001	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	100	100	100
	Prob. de falla, P_f (%)	0	0	0
250002	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	100	100	100
	Prob. de falla, P_f (%)	0	0	0
250003	Fiabilidad, $F=100-P_f$ (%)	100	100	100
	Prob. de falla, P_f (%)	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron 65000 simulaciones, en Microsoft Excel, para la implantación del Método de Monte Carlo (MMC). Los errores cometidos en la estimación de la probabilidad de falla y fiabilidad estructural resultaron menores del 1%, valor considerablemente bajo, por lo que se tiene una alta “confianza matemática” en los resultados obtenidos.

La probabilidad de falla conjunta corresponde al caso donde ocurren simultáneamente, la falla a tracción y compresión en el primer anillo del tanque.

La evaluación realizada demostró que los Tanques 9751, 9752, 9754, 9755, 9756, 130001 y 130002, 200001 al 200003 y 250001 al 250003, tienen una elevada fiabilidad estructural tanto a los esfuerzos de tracción o compresión en el primer anillo. El valor más bajo de fiabilidad estructural fue del 99% para los tanques 130001 y 130002, inducidos por la superposición de las cargas de operación y la acción sísmica esperada. Esta última estimada a través de la Norma Técnica PDVSA JA-221.

En cuanto a los niveles de fiabilidad o seguridad límites o aceptables, considerando la interpretación estadística de las incertidumbres, los códigos de diseño ACI 318 (2005) y el UBC-97, establecen factores de fiabilidad, ϕ , que dependen de una cierta categorización estructural, que varían entre 80% y 100%.

Estos valores son consistentes con incertidumbres asociadas a la resistencia nominal de los materiales de construcción y variaciones dimensionales, conocidos como factores de minoración de la resistencia en los códigos de diseño de estructura, los cuales dependiendo del tipo de sollicitación estructural, varían entre 0,70 y 0,90, fiabilidad entre el 75% al 90%, para una sollicitación.

Por otro lado el SEAOC (1995) propone los llamados niveles de comportamiento sísmico, los cuales han sido adaptados para tanques de almacenamiento cilíndricos, metálicos, verticales y se dan en la Tabla 23.

Tabla 23. Niveles de comportamiento sísmico

Nivel	Descripción del nivel de comportamiento sísmico	Fiabilidad asociada (%)
1	Totalmente operativo	90 a 100
2	Operativo	85 a 90
3	Resiste el sismo pero no está operativo	70 a 85
4	Cerca del colapso estructural, posible recuperación del activo	40 a 70
5	Colapso estructural, pérdida del activo	Menor de 40

Fuente: SEAOC (1995). *Structural Engineering Association of California. Report.* California. USA.

Finalmente, los valores aceptables de fiabilidad para tanques, también dependerán de otros factores de tipo gerencial, como por ejemplo: el riesgo que está dispuesto a asumir el propietario o responsable de la instalación, análisis riesgo/beneficio, los recursos económicos disponibles y la cobertura de las primas de seguro, entre otros.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se desarrolla en este trabajo de investigación, la evaluación de la fiabilidad estructural actual ante acciones sísmicas de los tanques de almacenamiento de crudo en el patio de tanque el Tejero, Edo. Monagas de PDVSA. En los tanques analizados se realizaron la medición de espesores de láminas de pared, fondo y techo, cuyos resultados fueron insumos para esta investigación. Se aplicó como método de simulación el Método de Monte Carlo (MMC), un método de Nivel II.

En el PTT existen 13 tanques de almacenamientos metálicos cilíndricos y no anclados de diferentes diámetros y alturas; diseñados bajo la norma API 650. Las paredes, el piso y placa anular de los tanques, están contruidos de láminas de acero ASTM A36. Los techos son flotantes y algunos con domo geodésico.

Las deformaciones de las paredes son causales de atascamiento de los techos flotantes llevando a estos al colapso. Estos detalles y otros deben ser corregidos en su próximo mantenimiento, así garantizar la integridad mecánica y las condiciones óptimas de operación y funcionamiento del activo.

A través de la revisión documental, se identificaron las fallas estructurales típicas que se pueden presentar en los tanques de almacenamiento, derivados de eventos sísmicos pasados, éstas se muestran en la tabla 19.

Para la estimación de las acciones sísmicas y evaluación de la relación entre la demanda y la capacidad (resistencia), se aplicaron las Normas Técnicas PDVSA JA-221, Diseño sismorresistente de instalaciones industriales y PDVSA FJ-251, Diseño sismorresistente de tanques metálicos.

Se adoptó un grado de riesgo D para la evaluación de los tanques de almacenamiento de combustibles, con una probabilidad anual de excedencia, $p_1=0,0001$; consistente con las graves consecuencias humanas, económicas y

ambientales, que podría tener un movimiento sísmico sobre estos equipos: rotura de soldaduras y láminas del cuerpo de tanques, pérdida del contenido almacenado, fuego post-sísmico, explosiones, entre otras.

Los valores de aceleración horizontal y vertical máxima del terreno, $A_o=0,49g$ y $A_v=0,34g$, respectivamente, indican que la amenaza sísmica para el sitio de interés califica como elevada.

Se identificaron como variables determinantes que gobiernan el problema de “la demanda” y “la resistencia” estructural a la altura de llenado, H_L , del tanque (variable o incertidumbre operacional); el esfuerzo cedente del material de construcción de paredes y fondo de tanques, F_y (variable o incertidumbre en la calidad del material de construcción) y la acción sísmica (variable o incertidumbre natural), más concretamente la aceleración horizontal, A_d .

Con base en las referencias consultadas, se caracteriza probabilísticamente como una distribución tipo normal, para tensión admisible del material, S_d , de fabricación del tanque. Como valor medio, μ , se adopta el valor de S_d especificado por la norma API 650 según la calidad del acero y un coeficiente de variación, CV , del 10%, es decir una desviación estándar, σ , igual a $0,10S_d$.

En cuanto a H_L , Se pudo precisar que por razones operacionales, la altura máxima de llenado del tanque, la cual se obtiene de restar a la altura total el borde libre, varía más o menos un 10%, por lo que se estable esta altura como valor medio y una desviación estándar, σ , igual a $0,10H_L$.

La aceleración conduce a tres variables aleatorias, asociables a los efectos convectivos e impulsivos y la componente vertical del sismo. Para efectos de esta investigación se adoptó un valor de CV del 20%, el cual conduce a una desviación estándar, σ , igual a $0,20A_d$.

A partir de la caracterización probabilística de las variables básicas, se generan entonces los valores aleatorios a ser empleado en las simulaciones.

La altura de llenado del tanque (H_L) y la calidad del material (S_d) se caracterizan como variables con distribución normal, mientras que la acción sísmica (Ad_1 , Ad_2 y Adv) con una distribución logarítmica normal.

Se realizaron 65000 simulaciones, en microsoft Excel, para la implantación del Método de Monte Carlo (MMC). La evaluación realizada demostró que los Tanques 9751, 9752, 9754, 9755, 9756, 130001 y 130002, 200001 al 200003 y 250001 al 250003, tienen una elevada fiabilidad estructural tanto a los esfuerzos de tracción o compresión en el primer anillo. El valor más bajo de fiabilidad estructural fue del 99% para los tanques 130001 y 130002, inducidos por la superposición de las cargas de operación y la acción sísmica esperada. Esta última estimada a través de la Norma Técnica PDVSA JA-221.

Se propone el método de Nivel II de Monte Carlo como método de simulación válido, para modelar y relacionar las variables determinantes y su carácter probabilístico en la estimación de la fiabilidad estructural y su complemento, la probabilidad de falla. Los resultados obtenidos por la aplicación de este método conducen a resultados de mayor confianza matemática con errores muy pequeños, siempre y cuando se realice un gran número de simulaciones.

5.2. Recomendaciones

Extender la metodología propuesta a tanques de almacenamiento anclados o a otros equipos de procesos tales como intercambiadores de calor, recipientes verticales y horizontales, hornos, reactores, entre otros.

Desarrollar o adoptar nuevas metodologías que simplifiquen el número de cálculos a realizar, de ser posible buscar algún método de tipo expedito, esto permitiría su masificación con un margen de incertidumbre aceptable.

Realizar estudios específicos de la peligrosidad sísmica y de los parámetros adecuados para cuantificarla y obtener otros parámetros sísmicos que puedan ser importantes para caracterizar la demanda sísmica. Esto es muy importante debido a que los mapas de zonificación sísmica no son actualizados con la periodicidad debida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, M. (2004). Evaluación de la fiabilidad en sostenimiento de túneles y galerías. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Arias, F. (2006). El proyecto de investigación: Guía para su elaboración. Caracas: Episteme.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 318 Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (2005). P.O. BOX 9094. Farmington Hills. Michigan 48333-9094. USA.
- American Petroleum Institute (API) y650 (2014). Welded tanks for oil storage. API publishing service. 1220 I Street, NW, Washington, DC 20005. USA.
- Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). Sulla Vulnerabilita Sismica degli Edifici in Muratura: Proposta di un Metodo di Valutazione. L'Indust Della Contruizion [Vulnerabilidad sísmica de edificios en Murutura: Propuesta de método de evaluación para la industria de la construcción]. Roma, Italia.
- Bermúdez, C. (2010). Vulnerabilidad sísmica de edificios de acero. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Bojórquez, E. (2009). Diseño sísmico de estructuras de acero basado en confiabilidad estructural y conceptos de energía, Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Sinaloa. Sinaloa, México.
- Calvi, G. (1999). A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of building. Journal of Earthquake Engineering, 3, pp. 411-438.
- Cornell, C. A. (1969). A probability based structural code. Journal of the American Concrete Institute (ACI). 66, pp. 974-985.
- Corsanego, A. y Petrini, V. (1990). Seismic vulnerability of building. Trabajo presentado en la 10th European Conference on Earthquake Engineering. Duma. Siria.

- Dolce, M. (1994). Vulnerability and risk analysis. Reporte del grupo de trabajo No. 3, presentado en la 11th European Conference on Earthquake Engineering. Viena, Australia.
- Echezuría, H. (2011). Procedimiento estadístico para obtener espectros elásticos con diferentes períodos de retorno compatibles con la amenaza sísmica, publicado en la revista de ingeniería de la UCAB.
- Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), 2010. Bogotá Frente a la Gestión Integral del Riesgo Sísmico. Bogotá, Colombia.
- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) (2014). <http://www.funvisis.gob.ve/amenaza.php>.
- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) (2002). La Investigación Sismológica en Venezuela, p. 85
- GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) (1986). Rischio Sismico di Edifici Pubblici. Consiglio Nazionale delle Ricerche Gruppo Nazionale per la Difesa, dai Terremoti [Riesgo sísmico de edificios públicos. Consejo nacional del grupo para la defensa de terremotos].
- GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) (1990). Rischio Sismico di Edifici Pubblici. Consiglio Nazionale delle Ricerche Gruppo Nazionale per la Difesa, dai Terremoti [Riesgo sísmico de edificios públicos. Consejo nacional del grupo para la defensa de terremotos].
- Gómez, M. y Alarcón, E. (1992). Introducción a la fiabilidad estructural y algunas aplicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Gulkan, P., Sozen, M., Demir, S. y Ersoy, U. (1996). An alternative evaluation for determining seismic vulnerability of building structures. Trabajo presentado en la 11th Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, México.
- Gutenberg B. y Richter C. (1954). Seismicity of the earth and associated phenomena. New Jersey: Princeton University Press.
- Informe técnico No. 14-IM-IT-021 (2014). Inspección e integridad mecánica de los tanques almacenamiento de combustibles de la P/D Catia La Mar, Estado. Vargas, Gerencia Técnica de Mercado Nacional. PDVSA.

- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2003). Metodología de la investigación. Distrito Federal: McGraw-Hill Interamericana.
- Housner, G. W. (1954). Dynamic pressures on accelerated fluid containers. Boletín de la Sociedad Sismológica de América, 47, pp. 313-346.
- JCSS (Joint Committe on Structural Safety) (1975). Comité técnico No. CEBCECM- CIB-FIP-LABSE-LASSS-RILEM. Darmstadt, Alemania.
- Manzanares, J. (2013). Estrategias gerenciales en la fiabilidad estructural de tanques de almacenamiento metálicos, cilíndricos y anclados ante acciones sísmicas, mediante un enfoque probabilístico. Tesis de Doctorado, Caribbean International University. Curaçao, NFL.
- OPS (Oficina Panamericana de la Salud) (1993). Desastres en las instalaciones de salud y reducción de la vulnerabilidad física y funcional. Washington DC, USA.
- Palella, S. y Martins, F. (2012). Metodología de la investigación cuantitativa. Tercera edición. Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Experimental Pedagógica Libertador (FEDEUPEL).
- Petróleos de Venezuela S. A. (PDVSA) JA-221 (2014). Diseño sismorresistente de recipientes y estructuras. Norma técnica. Los Teques: PDVSA.
- Petróleos de Venezuela S. A. (PDVSA) FJ-251 (2014). Diseño sismorresistente de tanques metálicos. Norma técnica. Los Teques: PDVSA.
- Sabino, C. (2002). El proceso de investigación. Caracas: El Cid.
- SEAOC (1995). Structural Association of California. Report. California. USA.
- Tamayo y Tamayo, M. (2001). Proceso de la investigación científica. Tercer Edición. México: Limusa.
- Torres, R. (2004). Estudio de la vulnerabilidad sísmica de puentes de hormigón armado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 2004.
- United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO) – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (1979). Natural

disasters and vulnerability analysis. Reporte de grupo de expertos. Reunión 9-12. Ginebra, Suiza.

- Valerino, E., Yaber, G. y Cemborain, M. (2010) Metodología de la investigación paso a paso Editorial Trillas.
- Withman, R., Reed, J. y Hong, S. (1974). Earthquake damage probability Matrices. Trabajo presentado en Fifth Conference on Earthquake Engineering, Roma, Italia.

Anexo A Datos de tanques del PTT

Fuente: Información levantada en campo por el personal de la Gerencia Técnica de Mantenimiento de equipos estáticos en jornadas de campo realizadas durante el año de 2017

Equipo 9751
TK: 9751
Fecha de instalación: 1945
Capacidad nominal (BLS): 97.000
Capacidad operativa (BLS): 85.584
Diámetro D (m): 36,58
Altura H(m): 15,83
Altura de llenado, HL(m): 13,11
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	18,650
2	2,44	N/D	N/D	16,52
3	2,44	N/D	N/D	13,97
4	2,44	N/D	N/D	10,77
5	2,44	N/D	N/D	6,39
6	2,44	N/D	N/D	5,98

Espesor placa anular, tb(mm): 8,00
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido
almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Domo Geodesico con interno flotante de aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 9500
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 9752
TK: 9752
Fecha de instalación: 1945
Capacidad nominal (BLS): 97.000
Capacidad operativa (BLS): 86.123
Diámetro D (m): 36,58
Altura H(m): 16,25
Altura de llenado, HL(m): 13,11
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	14,66
2	2,44	N/D	N/D	14,20
3	2,44	N/D	N/D	11,98
4	2,44	N/D	N/D	8,58
5	2,44	N/D	N/D	5,01
6	2,44	N/D	N/D	4,83

Espesor placa anular, tb(mm): 8,00
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido
almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Domo Geodesico con interno flotante de aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 9500
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 9754
TK: 9754
Fecha de instalación: 1945
Capacidad nominal (BLS): 97.000
Capacidad operativa (BLS): 86.745
Diámetro D (m): 36,58
Altura H(m): 15,86
Altura de llenado, HL(m): 13,11
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	16,02
2	2,44	N/D	N/D	11,49
3	2,44	N/D	N/D	9,78
4	2,44	N/D	N/D	8,07
5	2,44	N/D	N/D	5,60
6	2,44	N/D	N/D	5,30

Espesor placa anular, tb(mm): 8,00
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Domo Geodesico con interno flotante de aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 9500
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 9755
TK: 9755
Fecha de instalación: 1945
Capacidad nominal (BLS): 97.000
Capacidad operativa (BLS): 86.543
Diámetro D (m): 36,58
Altura H(m): 16,33
Altura de llenado, HL(m): 13,11
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	20,04
2	2,44	N/D	N/D	16,84
3	2,44	N/D	N/D	13,94
4	2,44	N/D	N/D	9,82
5	2,44	N/D	N/D	6,83
6	2,44	N/D	N/D	5,84

Espesor placa anular, tb(mm): 8,00
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Domo Geodesico con interno flotante de aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 9500
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 9756
TK: 9756
Fecha de instalación: 1945
Capacidad nominal (BLS): 97.000
Capacidad operativa (BLS): 86.264
Diámetro D (m): 36,58
Altura H(m): 15,57
Altura de llenado, HL(m): 13,11
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	18,23
2	2,44	N/D	N/D	14,80
3	2,44	N/D	N/D	11,01
4	2,44	N/D	N/D	5,77
5	2,44	N/D	N/D	4,74
6	2,44	N/D	N/D	4,32

Espesor placa anular, tb(mm): 8,00
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Domo Geodesico con interno flotante de aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 9500
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 130001
TK: 130001
Fecha de instalación: 1990
Capacidad nominal (BLS): 130.000
Capacidad operativa (BLS): 117.485
Diámetro D (m): 42,67
Altura H(m): 16,28
Altura de llenado, HL(m): 13,11
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	23,32
2	2,44	N/D	N/D	19,20
3	2,44	N/D	N/D	15,08
4	2,44	N/D	N/D	10,07
5	2,44	N/D	N/D	7,30
6	2,44	N/D	N/D	4,06

Espesor placa anular, tb(mm): 8,00
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Domo Geodesico con interno flotante de aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 11000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 130002
TK: 130002
Fecha de instalación: 1990
Capacidad nominal (BLS): 130.000
Capacidad operativa (BLS): 116.799
Diámetro D (m): 42,67
Altura H(m): 16,50
Altura de llenado, HL(m): 13,11
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	23,56
2	2,44	N/D	N/D	15,43
3	2,44	N/D	N/D	14,02
4	2,44	N/D	N/D	7,72
5	2,44	N/D	N/D	5,48
6	2,44	N/D	N/D	5,48

Espesor placa anular, tb(mm): 8,00
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Domo Geodesico con interno flotante de aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 11000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 200001
TK: 200001
Fecha de instalación: 1993
Capacidad nominal (BLS): 200.000
Capacidad operativa (BLS): 181.179
Diámetro D (m): 55,1688
Altura H(m): 18,2277
Altura de llenado, HL(m): 12,1920
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	31,06
2	2,44	N/D	N/D	28,85
3	2,44	N/D	N/D	21,03
4	2,44	N/D	N/D	14,94
5	2,44	N/D	N/D	9,83
6	2,44	N/D	N/D	7,92

Espesor placa anular, tb(mm): 9,53
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Techo Flotante de Aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 15000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 200002
TK: 200002
Fecha de instalación: 1993
Capacidad nominal (BLS): 200.000
Capacidad operativa (BLS): 181.047
Diámetro D (m): 55,1688
Altura H(m): 18,2277
Altura de llenado, HL(m): 12,1920
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	26,11
2	2,44	N/D	N/D	22,00
3	2,44	N/D	N/D	15,95
4	2,44	N/D	N/D	11,89
5	2,44	N/D	N/D	7,87
6	2,44	N/D	N/D	7,77

Espesor placa anular, tb(mm): 9,53
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Techo Flotante de Aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 15000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 200003
TK: 200003
Fecha de instalación: 1993
Capacidad nominal (BLS): 200.000
Capacidad operativa (BLS): 180.781
Diámetro D (m): 55,1688
Altura H(m): 17,2752
Altura de llenado, HL(m): 12,1920
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	N/D	N/D	25,96
2	2,44	N/D	N/D	22,33
3	2,44	N/D	N/D	15,77
4	2,44	N/D	N/D	12,19
5	2,44	N/D	N/D	8,03
6	2,44	N/D	N/D	7,92

Espesor placa anular, tb(mm): 9,53
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Techo Flotante de Aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 15000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 250001
TK: 250001
Fecha de instalación: 1997
Capacidad nominal (BLS): 250.000
Capacidad operativa (BLS): 222.204
Diámetro D (m): 55,1688
Altura H(m): 17,3101
Altura de llenado, HL(m): 12,1920
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	1,125	28,58	27,78
2	2,44	1,125	28,58	23,97
3	2,44	0,876	22,25	19,38
4	2,44	0,626	15,90	16,02
5	2,44	0,375	9,53	10,00
6	2,44	0,375	9,53	9,83

Espesor placa anular, tb(mm): 9,53
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Techo Flotante de Acero
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 15000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 250002
TK: 250002
Fecha de instalación: 1997
Capacidad nominal (BLS): 250.000
Capacidad operativa (BLS): 222.122
Diámetro D (m): 55,1688
Altura H(m): 17,6022
Altura de llenado, HL(m): 12,1920
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	1,125	28,58	28,09
2	2,44	1,125	28,58	25,15
3	2,44	0,876	22,25	19,58
4	2,44	0,626	15,90	16,51
5	2,44	0,375	9,53	10,16
6	2,44	0,375	9,53	10,06

Espesor placa anular, tb(mm): 9,53
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Techo Flotante de Aluminio
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 15000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Equipo 250003
TK: 250003
Fecha de instalación: 2001
Capacidad nominal (BLS): 250.000
Capacidad operativa (BLS): 222.856
Diámetro D (m): 55,1688
Altura H(m): 15,9385
Altura de llenado, HL(m): 12,1920
Geometría de los anillos:

No.	Altura (m)	Esp. Nom (pulg)	Esp. Nom (mm)	Esp. medido(mm)
1	2,44	1,125	28,58	25,96
2	2,44	1,125	28,58	22,33
3	2,44	0,876	22,25	15,77
4	2,44	0,626	15,90	12,19
5	2,44	0,375	9,53	8,03
6	2,44	0,375	9,53	7,92

Espesor placa anular, tb(mm): 9,53
Tipo de acero: ASTM A-36
Esfuerzo cedente del material, Fby (kg/cm2): 2533,00
Esfuerzo Sd (kg/cm2): 1631,00
Líquido almacenado: Crudo
Gravedad específica 0,7
Tipo de techo: Techo flotante de acero
Espesor lamina de techo, te(mm): N/D
Peso del techo, Wte (Kg): 15000
Altura CG techo, Xte (m): 14,64
Corrosión admisible (mm): 0
Anclado: NO

LEYENDA:

N/D No Disponible

Anexo B Resultados de las simulaciones para el MMC

TKS 9751

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,10%	0,00%	99,90%	100,00%	0,10%	99,90%
3000	0,13%	0,00%	99,87%	100,00%	0,13%	99,87%
4000	0,18%	0,00%	99,83%	100,00%	0,18%	99,83%
5000	0,14%	0,00%	99,86%	100,00%	0,14%	99,86%
6000	0,13%	0,00%	99,87%	100,00%	0,13%	99,87%
7000	0,11%	0,00%	99,89%	100,00%	0,11%	99,89%
8000	0,11%	0,00%	99,89%	100,00%	0,11%	99,89%
9000	0,14%	0,00%	99,86%	100,00%	0,14%	99,86%
10000	0,21%	0,00%	99,79%	100,00%	0,21%	99,79%
12000	0,20%	0,00%	99,80%	100,00%	0,20%	99,80%
14000	0,19%	0,00%	99,81%	100,00%	0,19%	99,81%
16000	0,21%	0,00%	99,79%	100,00%	0,21%	99,79%
18000	0,20%	0,00%	99,80%	100,00%	0,20%	99,80%
20000	0,19%	0,00%	99,81%	100,00%	0,19%	99,81%
25000	0,20%	0,00%	99,80%	100,00%	0,20%	99,80%
30000	0,20%	0,00%	99,80%	100,00%	0,20%	99,80%
35000	0,21%	0,00%	99,79%	100,00%	0,21%	99,79%
40000	0,20%	0,00%	99,80%	100,00%	0,20%	99,80%
45000	0,20%	0,00%	99,80%	100,00%	0,20%	99,80%
50000	0,19%	0,00%	99,81%	100,00%	0,19%	99,81%
55000	0,19%	0,00%	99,81%	100,00%	0,19%	99,81%
60000	0,21%	0,00%	99,79%	100,00%	0,21%	99,79%

TKS 9752

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,07%	0,03%	99,93%	99,97%	0,10%	99,90%
4000	0,05%	0,03%	99,95%	99,98%	0,08%	99,93%
5000	0,04%	0,04%	99,96%	99,96%	0,08%	99,92%
6000	0,03%	0,03%	99,97%	99,97%	0,07%	99,93%
7000	0,03%	0,03%	99,97%	99,97%	0,06%	99,94%
8000	0,04%	0,04%	99,96%	99,96%	0,08%	99,93%
9000	0,03%	0,03%	99,97%	99,97%	0,07%	99,93%
10000	0,03%	0,04%	99,97%	99,96%	0,07%	99,93%
12000	0,03%	0,04%	99,98%	99,96%	0,07%	99,93%
14000	0,04%	0,04%	99,96%	99,96%	0,07%	99,93%
16000	0,04%	0,03%	99,96%	99,97%	0,08%	99,93%
18000	0,05%	0,03%	99,95%	99,97%	0,08%	99,92%
20000	0,05%	0,03%	99,95%	99,97%	0,08%	99,92%
25000	0,05%	0,03%	99,95%	99,97%	0,08%	99,92%
30000	0,04%	0,03%	99,96%	99,97%	0,07%	99,93%
35000	0,04%	0,03%	99,96%	99,97%	0,07%	99,93%
40000	0,05%	0,03%	99,95%	99,97%	0,08%	99,92%
45000	0,04%	0,04%	99,96%	99,96%	0,08%	99,92%
50000	0,04%	0,04%	99,96%	99,96%	0,07%	99,93%
55000	0,04%	0,04%	99,96%	99,96%	0,07%	99,93%
60000	0,04%	0,05%	99,96%	99,95%	0,09%	99,91%

TKS 9754

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
5000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
6000	0,02%	0,00%	99,98%	100,00%	0,02%	99,98%
7000	0,01%	0,00%	99,99%	100,00%	0,01%	99,99%
8000	0,01%	0,00%	99,99%	100,00%	0,01%	99,99%
9000	0,01%	0,00%	99,99%	100,00%	0,01%	99,99%
10000	0,01%	0,00%	99,99%	100,00%	0,01%	99,99%
12000	0,02%	0,00%	99,98%	100,00%	0,02%	99,98%
14000	0,01%	0,00%	99,99%	100,00%	0,01%	99,99%
16000	0,01%	0,00%	99,99%	100,00%	0,01%	99,99%
18000	0,02%	0,00%	99,98%	100,00%	0,02%	99,98%
20000	0,02%	0,00%	99,99%	100,00%	0,02%	99,99%
25000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
30000	0,02%	0,00%	99,98%	100,00%	0,02%	99,98%
35000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
40000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
45000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
50000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
55000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
60000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%

TKS 9755

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,20%	0,00%	99,80%	100,00%	0,20%	99,80%
1000	0,10%	0,00%	99,90%	100,00%	0,10%	99,90%
2000	0,10%	0,00%	99,90%	100,00%	0,10%	99,90%
3000	0,10%	0,00%	99,90%	100,00%	0,10%	99,90%
4000	0,13%	0,00%	99,88%	100,00%	0,13%	99,88%
5000	0,18%	0,00%	99,82%	100,00%	0,18%	99,82%
6000	0,17%	0,00%	99,83%	100,00%	0,17%	99,83%
7000	0,17%	0,00%	99,83%	100,00%	0,17%	99,83%
8000	0,16%	0,00%	99,84%	100,00%	0,16%	99,84%
9000	0,18%	0,00%	99,82%	100,00%	0,18%	99,82%
10000	0,17%	0,00%	99,83%	100,00%	0,17%	99,83%
12000	0,16%	0,00%	99,84%	100,00%	0,16%	99,84%
14000	0,16%	0,00%	99,84%	100,00%	0,16%	99,84%
16000	0,16%	0,00%	99,84%	100,00%	0,16%	99,84%
18000	0,15%	0,00%	99,85%	100,00%	0,15%	99,85%
20000	0,15%	0,00%	99,85%	100,00%	0,15%	99,85%
25000	0,14%	0,00%	99,86%	100,00%	0,14%	99,86%
30000	0,13%	0,00%	99,87%	100,00%	0,13%	99,87%
35000	0,14%	0,00%	99,86%	100,00%	0,14%	99,86%
40000	0,13%	0,00%	99,87%	100,00%	0,13%	99,87%
45000	0,14%	0,00%	99,86%	100,00%	0,14%	99,86%
50000	0,14%	0,00%	99,86%	100,00%	0,14%	99,86%
55000	0,15%	0,00%	99,85%	100,00%	0,15%	99,85%
60000	0,18%	0,00%	99,82%	100,00%	0,18%	99,82%

TKS 9756

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,03%	0,00%	99,98%	100,00%	0,03%	99,98%
5000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
6000	0,05%	0,00%	99,95%	100,00%	0,05%	99,95%
7000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
8000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
9000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
10000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
12000	0,03%	0,00%	99,98%	100,00%	0,03%	99,98%
14000	0,03%	0,00%	99,97%	100,00%	0,03%	99,97%
16000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
18000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
20000	0,05%	0,00%	99,96%	100,00%	0,05%	99,96%
25000	0,05%	0,00%	99,95%	100,00%	0,05%	99,95%
30000	0,05%	0,00%	99,95%	100,00%	0,05%	99,95%
35000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
40000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
45000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
50000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
55000	0,04%	0,00%	99,96%	100,00%	0,04%	99,96%
60000	0,02%	0,00%	99,98%	100,00%	0,02%	99,98%

TKS 130001

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	1,20%	0,00%	98,80%	100,00%	1,20%	98,80%
1000	1,10%	0,00%	98,90%	100,00%	1,10%	98,90%
2000	1,30%	0,00%	98,70%	100,00%	1,30%	98,70%
3000	1,17%	0,00%	98,83%	100,00%	1,17%	98,83%
4000	1,15%	0,00%	98,85%	100,00%	1,15%	98,85%
5000	1,20%	0,00%	98,80%	100,00%	1,20%	98,80%
6000	1,17%	0,00%	98,83%	100,00%	1,17%	98,83%
7000	1,16%	0,00%	98,84%	100,00%	1,16%	98,84%
8000	1,16%	0,00%	98,84%	100,00%	1,16%	98,84%
9000	1,16%	0,00%	98,84%	100,00%	1,16%	98,84%
10000	1,14%	0,00%	98,86%	100,00%	1,14%	98,86%
12000	1,17%	0,00%	98,83%	100,00%	1,17%	98,83%
14000	1,18%	0,00%	98,82%	100,00%	1,18%	98,82%
16000	1,18%	0,00%	98,83%	100,00%	1,18%	98,83%
18000	1,13%	0,00%	98,87%	100,00%	1,13%	98,87%
20000	1,15%	0,00%	98,85%	100,00%	1,15%	98,85%
25000	1,20%	0,00%	98,80%	100,00%	1,20%	98,80%
30000	1,21%	0,00%	98,79%	100,00%	1,21%	98,79%
35000	1,19%	0,00%	98,81%	100,00%	1,19%	98,81%
40000	1,23%	0,00%	98,78%	100,00%	1,23%	98,78%
45000	1,27%	0,00%	98,73%	100,00%	1,27%	98,73%
50000	1,27%	0,00%	98,73%	100,00%	1,27%	98,73%
55000	1,28%	0,00%	98,72%	100,00%	1,28%	98,72%
60000	1,26%	0,00%	98,74%	100,00%	1,26%	98,74%

TKS 130002

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	1,00%	0,00%	99,00%	100,00%	1,00%	99,00%
1000	0,90%	0,00%	99,10%	100,00%	0,90%	99,10%
2000	0,65%	0,00%	99,35%	100,00%	0,65%	99,35%
3000	0,67%	0,00%	99,33%	100,00%	0,67%	99,33%
4000	0,68%	0,00%	99,33%	100,00%	0,68%	99,33%
5000	0,72%	0,00%	99,28%	100,00%	0,72%	99,28%
6000	0,78%	0,00%	99,22%	100,00%	0,78%	99,22%
7000	0,77%	0,00%	99,23%	100,00%	0,77%	99,23%
8000	0,76%	0,00%	99,24%	100,00%	0,76%	99,24%
9000	0,82%	0,00%	99,18%	100,00%	0,82%	99,18%
10000	0,83%	0,00%	99,17%	100,00%	0,83%	99,17%
12000	0,87%	0,00%	99,13%	100,00%	0,87%	99,13%
14000	0,92%	0,00%	99,08%	100,00%	0,92%	99,08%
16000	0,91%	0,00%	99,09%	100,00%	0,91%	99,09%
18000	0,93%	0,00%	99,07%	100,00%	0,93%	99,07%
20000	0,90%	0,00%	99,11%	100,00%	0,90%	99,11%
25000	0,91%	0,00%	99,09%	100,00%	0,91%	99,09%
30000	0,94%	0,00%	99,06%	100,00%	0,94%	99,06%
35000	0,97%	0,00%	99,03%	100,00%	0,97%	99,03%
40000	0,96%	0,00%	99,05%	100,00%	0,96%	99,05%
45000	0,94%	0,00%	99,06%	100,00%	0,94%	99,06%
50000	0,95%	0,00%	99,05%	100,00%	0,95%	99,05%
55000	0,97%	0,00%	99,03%	100,00%	0,97%	99,03%
60000	0,99%	0,00%	99,01%	100,00%	0,99%	99,01%

TKS 200001

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
5000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
6000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
7000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
8000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
9000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
10000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
12000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
14000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
16000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
18000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
20000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
25000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
30000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
35000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
40000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
45000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
50000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
55000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
60000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%

TKS 200002

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
5000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
6000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
7000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
8000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
9000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
10000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
12000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
14000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
16000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
18000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
20000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
25000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
30000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
35000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
40000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
45000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
50000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
55000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
60000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%

TKS 200003

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
5000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
6000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
7000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
8000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
9000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
10000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
12000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
14000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
16000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
18000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
20000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
25000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
30000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
35000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
40000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
45000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
50000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
55000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
60000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%

TKS 250001

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
5000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
6000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
7000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
8000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
9000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
10000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
12000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
14000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
16000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
18000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
20000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
25000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
30000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
35000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
40000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
45000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
50000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
55000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
60000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%

TKS 250002

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
5000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
6000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
7000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
8000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
9000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
10000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
12000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
14000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
16000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
18000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
20000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
25000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
30000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
35000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
40000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
45000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
50000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
55000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
60000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%

TKS 250003

Numero de Eventos	Probabilidad de Falla		Fiabilidad		Probabilidad de Falla Conjunta	
	Compresión	Tracción	Compresión	Tracción	Probabilidad de Falla	Fiabilidad
500	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
1000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
2000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
3000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
4000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
5000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
6000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
7000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
8000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
9000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
10000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
12000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
14000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
16000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
18000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
20000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
25000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
30000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
35000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
40000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
45000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
50000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
55000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%
60000	0,00%	0,00%	100,00%	100,00%	0,00%	100,00%