

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL Y EN SERVICIO DE UN
TANQUE CORTADOR DE PETRÓLEO AFECTADO POR
CORROSIÓN Y ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES DE LA BASE**

Proyecto Integrador Profesional
presentado por

CINDY GERALDINE WOZNIUK

ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue
para acceder al título de

INGENIERA CIVIL

Dirección de tesis:

DRA. ING. ROSSANA JACA

Co Dirección de tesis:

DRA. ING. MÓNICA ZALAZAR

Neuquén, 19 de noviembre 2020

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Silvia y Ricardo como a mi hermana Ethel por el apoyo incondicional, consejos y cariño brindado durante toda mi vida,

A la Dra. Ing. Rossana Jaca y la Dra. Ing. Mónica Zalazar por dirigir el presente trabajo. Por su buena predisposición, conocimientos y dedicación fue posible cumplir los objetivos planteados,

A mi tutora de pasantía Alejandra Cosentino como a mi compañero de trabajo Marcelo Manzano quienes me ayudaron a elegir el tema de tesis ya que conocían el caso real a analizar,

A mi tutora universitaria de pasantía, la Dra. Ing. Anabel Apcarian por el seguimiento y el dictado de la materia optativa Estabilidad IV. Con sus clases y bibliografía me brindó los conocimientos necesarios sobre el marco teórico presentado,

A mis profesores universitarios quienes transmitieron sus conocimientos y continúan brindando su ayuda en el ámbito profesional,

Al Dr. Ing. Eduardo Sosa por su orientación en cuanto al modelado y análisis mediante el Software ABAQUS (2010),

A Gabriela Agosta por brindarme su ayuda y cariño desde que llegué a Neuquén,

A todos mis amigos y compañeros de estudio que me acompañaron durante toda la carrera.

RESUMEN

El presente trabajo aborda el análisis del comportamiento estructural de un tanque cortador de petróleo con evidencia de daño por corrosión y asentamientos diferenciales y su respuesta bajo la acción de viento. La investigación está basada en los resultados de ensayos no destructivos realizados durante los últimos años en un tanque cortador emplazado en la Provincia de Santa Cruz, que se encuentra actualmente en verificación. Dicha tipología de tanques se utiliza en la industria petrolera para realizar la separación de agua y petróleo, obteniendo así un producto bajo las especificaciones solicitadas en la industria. El análisis se implementa mediante el modelado del tanque con un código de elementos finitos de propósitos múltiples (ABAQUS) y el posterior procesamiento de los resultados obtenidos permite concluir sobre la gravedad del daño por corrosión y desnivelación de la base. El estudio se realiza planteando distintos escenarios: estado inicial del tanque (sin deformación), estado actual del tanque (espesores medidos por ultrasonido y desnivelación obtenida mediante un trabajo de topografía) y estado futuro (avance del deterioro). Mediante la simulación numérica se estudia la influencia de los efectos de forma aislada y luego combinados entre sí con la acción del fluido en el interior del tanque y viento, debido a que en la zona de emplazamiento se registran fuertes vientos. El estudio se implementa mediante Análisis de Bifurcación Lineal (LBA) y Análisis No Lineal Geométrico (GNLA), evaluando configuraciones de deformadas y tensionales, asociadas a estados críticos y poscríticos. Los resultados confirman que la disminución de espesor y los asentamientos diferenciales generan concentración de tensiones aumentando el deterioro de la estructura. El estado más desfavorable para la misma ocurre cuando el tanque se encuentra sin fluido en su interior y con los daños ubicados a barlovento. Las trayectorias de equilibrio son no lineales con un aumento indefinido de los desplazamientos indicando inestabilidad. La presencia de las imperfecciones, tales como reducción del espesor y asentamientos de apoyo, desvía a la estructura del sistema perfecto y el pandeo de bifurcación ocurre para cargas mucho más bajas. Existe plastificación en sectores de la envolvente por lo cual es probable el desarrollo de fisuras y el derrame del producto durante el servicio. Es fundamental la implementación de medidas correctivas para evitar el colapso del tanque lo cual generaría pérdidas económicas, sociales y ambientales no menores.

Palabras claves: Tanque cortador, corrosión, asentamiento, viento, inestabilidad.

ABSTRACT

This project addresses the analysis of the structural behaviour of a gunbarrel tank (separation tank) with evidence of corrosion damage and differential settlements and its response under the action of wind. The research is based on the results of non-destructive tests carried out in recent years in a cutter tank located in the Province of Santa Cruz, which is currently under verification. This type of tanks is used in the oil industry to separate water and oil thus obtaining a product under the specifications requested in the industry. The analysis is implemented by modeling the tank with a multipurpose finite element code (ABAQUS) and the subsequent processing of the results obtained allows to conclude on the severity of the damage due to corrosion and unevenness of the base. The study is carried out proposing different scenarios: initial state of the tank (without deformation), current state of the tank (thickness measured by ultrasound and unevenness obtained by surveying work) and future state (progress of deterioration). By means of the simulation, the influence of the effects is studied in isolation and in combination with the action of the fluid inside the tank and wind, due to the fact that strong winds are registered in the site area. The study is implemented through Linear Bifurcation Analysis (LBA) and Geometric Nonlinear Analysis (GNLA), evaluating deformed and tensional configurations, associated with critical and post-critical states. The results confirm that the decrease in thickness and the differential settlements generate stress concentration increasing the deterioration of the structure. The most unfavorable state for it occurs when the tank is without fluid inside and with the damages located to the windward side. The equilibrium paths are nonlinear with an indefinite increase in the displacements indicating instability. The presence of imperfections, such as thinning and support settlements, diverts the structure from the perfect system and bifurcation buckling occurs for much lower loads. There is plasticization in sectors of the envelope, which is why the development of cracks and the spillage of the product during service is likely. It is essential to implement corrective measures to avoid the collapse of the tank, which would generate no minor economic, social and environmental losses.

Keywords: Gunbarrel tank, corrosion, settlement, wind, instability.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 FUNDAMENTOS	1
1.3 METODOLOGÍA	3
1.4 ÁMBITO DE DESARROLLO	3
1.5 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	4
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 TEORÍA DE CÁSCARAS	5
2.1.1 CÁSCARAS COMO ESTRUCTURAS	5
2.1.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	7
2.1.3 ANÁLISIS DE BIFURCACIÓN LINEAL (LBA)	11
2.1.4 ANÁLISIS NO LINEAL GEOMÉTRICO (GNLA)	12
2.1.5 ANÁLISIS NO LINEAL GEOMÉTRICO CON IMPERFECCIONES (GNIA) 15	
2.2 TANQUES CORTADORES	16
2.3 AMENAZAS Y MECANISMOS DE DAÑO	18
2.3.1 GENERALIDADES	18
2.3.2 CORROSIÓN	18
2.3.3 ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES DE APOYOS	20
2.4 PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN	22
2.5 NORMATIVAS DE REFERENCIA	23
CAPÍTULO 3	24
CASO DE ESTUDIO	24
3.1 LOCALIZACIÓN	24
3.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL TANQUE	25
3.3 CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE	25
3.3.1 DATOS GENERALES	25

3.3.2	CONEXIONES Y ACCESORIOS	26
3.4	ANTECEDENTES	26
3.5	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS:	27
3.6	RESULTADOS DE INFORMES	30
3.6.1	INSPECCIÓN VISUAL EXTERNA	30
3.6.2	EVALUACIÓN DE CORRÓSION	31
3.6.3	EVALUACIÓN DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES DE LA BASE ..	35
CAPÍTULO 4.....		40
DISEÑO ESTRUCTURAL.....		40
4.1	MATERIALES	40
4.2	ANÁLISIS DE CARGAS.....	40
4.3	CÁLCULO DE LA ENVOLVENTE	43
4.4	CÁLCULO DEL TECHO	46
4.5	FUNDACIÓN	49
CAPÍTULO 5.....		51
MODELO Y RESULTADOS COMPUTACIONALES		51
5.1	CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE ABAQUS	51
5.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	51
5.3	METODOLOGÍA.....	54
5.4	INFLUENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ESPESORES POR CORROSIÓN	55
5.4.1	ANÁLISIS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES	56
5.4.2	AVANCE DE CORROSIÓN	59
5.4.3	ANÁLISIS DE BIFURCACIÓN COMBINANDO CORROSIÓN Y VIENTO	60
5.5	INFLUENCIA DE LOS ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN EL APOYO	63
5.5.1	ANÁLISIS DE BIFURCACIÓN (LBA).....	63
5.5.2	ANÁLISIS NO LINEAL GEOMÉTRICO (GNLA).....	64
5.5.3	ANÁLISIS COMBINANDO ASENTAMIENTOS Y VIENTO	67
5.6	ANÁLISIS DEL TANQUE EN ESTADO ACTUAL.....	68
5.7	ANÁLISIS DEL TANQUE EN ESTADO FUTURO.....	70

5.8	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
CAPÍTULO 6	78
DETERMINACIÓN Y CATEGORIZACIÓN DEL RIESGO	78
6.1	CONSIDERACIONES PRINCIPALES	78
6.2	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	78
6.3	CRITERIOS	82
6.4	VALORACIÓN	83
	Exposición	83
6.5	RIESGO	84
CAPÍTULO 7	86
CONCLUSIÓN	86
7.1	SÍNTESIS	86
7.2	PRINCIPALES APORTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	86
7.3	CAUSAS Y ACCIONES CORRECTIVAS	88
7.4	FUTURAS INVESTIGACIONES	90
7.5	SOSTENIBILIDAD Y RESPONSABILIDAD SOCIAL	90
BIBLIOGRAFÍA	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Denominaciones de la cáscara de revolución.	5
Figura 2.2: Características de las cáscaras de rotación normales: a) Fuerzas normales y fuerzas tangenciales repartidas, b) Fuerzas de corte repartidas, c) Momentos flectores y momentos torsores uniformemente repartidos.	6
Figura 2.3: Pandeo de tanques: (a) Falla por Huracán Katrina, Fish Oil, Port Sulphur (2005), (b) Falla por viento en etapa constructiva, Patagonia Argentina (2001), (c) Falla por descenso en apoyo, Puerto Rico (2010), (d) Falla por corrosión.	8
Figura 2.4: Diagramas carga deformación mostrando trayectorias de equilibrio (a) punto crítico, y (b) punto de bifurcación.	8
Figura 2.5: Estados críticos: (a) Casi coincidentes y con bifurcación secundaria, (b) Coincidentes: dos o más modos críticos asociados a la misma carga crítica.	9
Figura 2.6: Tres tipos de bifurcación para modos aislados, (a) Bifurcación simétrica estable, (b) Bifurcación simétrica inestable, (c) Bifurcación asimétrica inestable.	10
Figura 2.7: Respuesta típica estática inestable.	13
Figura 2.8: Algoritmo modificado de Riks.	14
Figura 2.9: Influencia de las imperfecciones en el comportamiento de bifurcación de los sistemas estructurales, (a) Bifurcación simétrica estable, (b) Bifurcación simétrica inestable, (c) Bifurcación asimétrica inestable.	16
Figura 2.10: (a) Esquema del tanque con internos del tipo platos, (b) esquema del tanque con internos tipo araña.	17
Figura 2.11: Tipologías de placas deflectoras tipo arañas.	17
Figura 2.12: Esquema asentamiento diferencial de apoyos.	21
Figura 3.1: Ubicación de Las Heras, Santa Cruz.	24
Figura 3.2 Ubicación satelital del tanque en estudio, (a) Vista general de la batería, (b) Detalle del tanque estudiado.	24
Figura 3.3: Esquema envolvente.	25
Figura 3.4: Cañería de rebalse.	26
Figura 3.5: Esquema de procedimiento de limpieza.	27
Figura 3.6: a) Esquema de grilla de medición de espesores para tanque de almacenamiento, b) Esquema de grilla en envolvente de tanques.	29
Figura 3.7: Daños registrados en inspección (2016): (a) Derrame de producto, (b) Corrosión en el techo.	30
Figura 3.8: Derrame de producto y deterioro en revestimiento (2016).	31
Figura 3.9: Corrosión en el techo (2016).	31
Figura 3.10: Socavación de terraplén y fisuras en la de base de hormigón (2016).	31
Figura 3.11: Cuadrículas de medición sobre la envolvente en la primera virola.	32

Figura 3.12: Ensayos sobre Chapa 18 de la Virola 1, (a) Vista general, (b) Detalle de cuadrícula A6, (c) Espesores en cuadrícula A6.	33
Figura 3.13: Ensayos sobre Chapa 18 de la Virola 1, (a) Vista general, (b) Detalle de cuadrícula A10, (c) Espesores en cuadrícula A10, (d) Registro B-SCAN.	34
Figura 3.14: Plano 3D con las mediciones de topografía (AutoCAD).	36
Figura 3.15: Vista en planta del tanque con la nube de mediciones de topografía.	37
Figura 3.16: Nube de puntos 3D en AutoCAD.	37
Figura 3.17: Gráfico con curvas de asentamientos.	39
Figura 4.1: a) Talud del tanque, b) Esquema del recinto de contención del tanque.	41
Figura 4.2: Conformación del terraplén, platea perimetral y anillo de hormigón de un tanque API 650 (2013).	50
Figura 4.3: Fundación del tanque en estudio.	50
Figura 5.1: Tanque en módulo part ABAQUS (2006).	52
Figura 5.2: Tanque en módulo load ABAQUS (2006), a) Definición carga de viento, b) Definición cargas de fluido y nieve.	53
Figura 5.3: Tanque en módulo mesh ABAQUS (2006).	53
Figura 5.4: Grupos de espesores en la envolvente del tanque.	56
Figura 5.5: Desplazamientos en el estado inicial del tanque.	57
Figura 5.6: Desplazamientos en estado actual del tanque (corrosión medida), (a) Factor de deformación 1, (b) Factor de deformación 10.	57
Figura 5.7: Tensiones S11: (a) Estado inicial del tanque, (b) Estado actual del tanque (corrosión medida).	58
Figura 5.8: Tensiones S22 a) Estado inicial del tanque, b) Estado actual del tanque (corrosión medida).	58
Figura 5.9: Tensiones de Von Mises: (a) Estado inicial del tanque, (b) Estado actual del tanque.	59
Figura 5.10: Esquema avance de corrosión: (a) Vista en planta del tanque, (b) Vista frontal de la envolvente.	60
Figura 5.11: Forma de modo crítico para el tanque en estado inicial bajo viento ($\lambda^C = 1,95$ kN/m ²).	61
Figura 5.12: Forma de modo crítico con espesor reducido en zona medida ($\lambda^C = 1,85$ kN/m ²).	62
Figura 5.13: Modelado de asentamientos en ABAQUS (2006).	63
Figura 5.14: Forma de modo crítico con asentamientos medidos ($\lambda^C = 0,232$).	64
Figura 5.15: Deformada bajo sollicitación de asentamientos verticales (Nodo A: mayor desplazamiento fuera del plano).	65
(b)	66
Figura 5.16: Trayectoria de equilibrio bajo sollicitación de asentamientos para el nodo con mayor desplazamiento fuera del plano (Nodo A), (a) Etapa inicial, (b) Etapa poscrítica avanzada.	66

Figura 5.17: Deformada bajo sollicitación de viento y asentamientos verticales (Mayor desplazamiento en Nodo B).....	67
Figura 5.18: Trayectoria de equilibrio bajo sollicitación de viento y asentamientos verticales (Nodo B).....	68
Figura 5.19: Forma de modo crítico con corrosión y asentamientos medidos ($\lambda^C = 0,0926$).	68
Figura 5.20: Resultados de tensiones de Von Mises para el estado poscrítico avanzado (asentamientos diferenciales y corrosión medida a barlovento).....	70
Figura 5.21: Forma de modo crítico con asentamientos y espesor mínimo medido ($\lambda^C = 0,0353$)......	71
Figura 5.22: Deformada bajo sollicitación de asentamientos verticales, espesor mínimo medido y viento (Nodo C).....	71
Figura 5.23: Trayectoria de equilibrio en el estado futuro del tanque bajo sollicitación de viento (Nodo C).....	72
Figura 5.24: Análisis no lineal geométrico (Riks) para asentamientos medidos: (a): Sin sollicitación de viento, (b): Con sollicitación de viento.	74
Figura 5.25: Análisis no lineal geométrico (Riks) para el estado actual del tanque bajo sollicitación de viento.	74
Figura 5.26: Existencia de filtraciones de petróleo en la envolvente del tanque analizado: (a): Virolas inferiores, (b): Virolas superiores.	75
Figura 5.27: Análisis del estado actual del tanque: (a) LBA (Buckle), (b) GNIA (Riks). ..	75
Figura 5.28: Trayectorias de equilibrio obtenidas mediante el método de Riks (Análisis GNIA) para el estado actual y futuro del tanque.	76
Figura 5.29: Análisis de asentamiento puntual de la envolvente: (a): Malla de elementos finitos, (b) Deformada en la envolvente.	77
Figura 7.1: Los 3 pilares de la sostenibilidad.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Resultado del total de las mediciones sobre la envolvente.	35
Tabla 3.2: Resultado de las mediciones en ensayo de asentamiento.....	36
Tabla 3.3: Resultados de mediciones topográficas de asentamientos.	38
Tabla 4.1: Cálculo presiones de viento cubierta.....	42
Tabla 4.2: Datos del material del tanque.....	43
Tabla 4.3: Datos de diseño del tanque.....	44
Tabla 4.4: Cálculos del espesor de la envolvente.....	45
Tabla 4.5: Resultados de espesores de virolas.....	46
Tabla 4.6: Cálculo espesor de techo del tanque.....	47
Tabla 4.7: Cálculo de las combinaciones de carga para el espesor del techo umbrella.	49
Tabla 4.8: Combinaciones de carga.....	49
Tabla 4.9: Mayores cargas gravitatorias con/sin carga de nieve equilibrada.	49
Tabla 4.10: Mínimos espesores techo.....	49
Tabla 5.1: Resultados de cargas y velocidades críticas con la corrosión a barlovento.	62
Tabla 6.1: Categoría de riesgo y actuaciones necesarias.....	79
Tabla 6.2: Tabla de exposición.....	79
Tabla 6.3: Matriz de exposición.	80
Tabla 6.4: Matriz de consecuencia.	81
Tabla 6.7: Categoría del valor de la probabilidad para derrame e incendio.....	82
Tabla 6.8: Matriz de probabilidad.	82

SIMBOLOGÍA

a	radio de curvatura del paralelo [m]
A_{virola}	altura virola [m]
CA	corrosión permisible [mm]
Ce	factor de exposición
Cp	coeficiente de presión
Cs	factor de pendiente
Ct	factor térmico
D	diámetro nominal del tanque del tanque [m]
Dl	carga muerta techo [kPa]
D_{θ}	momentos torsores en meridianos por unidad de longitud [kNm/m]
D_{φ}	momentos torsores en paralelos por unidad de longitud [kNm/m]
E	módulo de elasticidad [MPa]
g	constante de gravedad [m/s ²]
G	factor de efecto de ráfaga
Gr	densidad relativa del líquido almacenado o del agua para calculo por prueba hidrostática
H	altura del talud en [m]
Hv	altura de diseño del nivel del líquido [m]
I	factor de importancia
$[Ke]$	matriz de rigidez lineal del sistema [kN/m]
$[K_{\sigma}(\sigma)]$	matriz de estado inicial evaluada en el estado tensional $\{\sigma\}$ [kN/m]
$[K]$	matriz de rigidez global [kN/m]
K_0^{NM}	matriz de rigidez tangente [kN/m]
Kd	factor de direccionalidad del viento
Kzt	coeficiente topográfico
Kz o Kzh	factor de exposición
Lh	longitud horizontal hasta cresta del talud [m]
Lr	mínima carga viva para techo [kN/m ²]
l	longitud de la trayectoria [m]
Ls	separación entre generatrices verticales de cuadrícula de medición (mm)
M_{θ}	momentos flectores alrededor de paralelos [kNm/m]
M_{φ}	momentos flectores alrededor de meridianos [kNm/m]
N	grados de libertad del modelo
Nc	velocidad de corrosión del cuerpo [milésimas de pulgada/año]
N°	número de virolas
N_{θ}	fuerzas normales por unidad de longitud en dirección de meridianos [kN/m]
N_{φ}	fuerzas normales por unidad de longitud en dirección de paralelos [kN/m]
qz	presión dinámica [kN/m ²]
P	carga aplicada [kN]
$\{P_{cr}\}$	carga crítica para la cual se produce la inestabilidad [kN]
P_o	carga estado inicial [kN]
P^N	patrón de carga

p	presión de viento externa [kN/m ²]
P_c	punto crítico o de bifurcación
P_e	presión externa específica [kN/m ²]
P_s	carga de nieve para cubiertas con pendiente [kN/m ²]
p_f	carga de nieve sobre cubierta plana [kN/m ²]
p_g	carga de nieve a nivel del terreno [kN/m ²]
p_i	combinaciones de carga para el cálculo del techo umbrella [kN/m ²]
Q_θ	fuerzas de corte por unidad de longitud en dirección de paralelos [kN/m]
Q_φ	fuerzas de corte por unidad de longitud en dirección de meridianos [kN/m]
RCA	diferencia entre el espesor de la cáscara medido y el espesor mínimo requerido [milésimas de pulgada]
rr	radio del techo en [m]
$r\theta$	radio de la curvatura del meridiano [m]
$r\varphi$	longitud de la normal a la cáscara desde un punto sobre la superficie hasta el eje de la cáscara [m]
$Sarc$	punto de inflexión de la curva de asentamientos
S_b	carga de nieve balanceada [kN/m ²]
S_d	esfuerzo permisible por condiciones de diseño [MPa]
S_i	longitud de arco de la corrosión medida a barlovento [m]
S_t	esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática [Mpa]
S_u	carga de nieve desbalanceada [kN/m ²]
S_{11}	tensiones en dirección de los paralelos [MPa]
S_{22}	tensiones en dirección de los meridianos [MPa]
T_b	la mayor de las combinaciones de carga gravitatorias con carga de nieve equilibrada S_b [kN/m ²]
T_θ	fuerzas tangenciales por unidad de longitud en sentido de paralelos [kN/m]
T_φ	fuerzas tangenciales por unidad de longitud en sentido de meridianos [kN/m]
t	espesor del elemento de cáscara [m]
t_d	espesor por condiciones de diseño [mm]
t_{min}	espesor mínimo virola [mm]
t_s	tiempo de tránsito a través del material [m/s]
t_t	espesor por prueba hidrostática [mm]
t_{techo}	espesor del techo [mm]
U	magnitud desplazamiento fuera del plano [m]
U_3	desplazamiento vertical nodo apoyo [m]
U_u	ídem T_b sin carga de nieve equilibrada S_u [kN/m ²]
$\{u_0\}$	desplazamientos resultantes de la carga aplicada $\{P_0\}$ [m]
(\bar{u})	valor máximo absoluto de todas las variables de desplazamiento [m]
u	desplazamiento arbitrario [m]
V	velocidad básica del viento [m/s]
V_s	velocidad del sonido en el material [m/s]
x	distancia desde la cresta hasta la ubicación del tanque [m]

Y	tensión de fluencia del material [MPa]
Z	cota de mediciones de asentamientos [m]
z	altura sobre el nivel del terreno [m]
δ	desplazamientos verticales medidos [m]
Δ	incremento diferencial
θ	ángulo entre el eje de la cáscara y la normal de la cáscara [°]
λ	Factor de proporcionalidad asociado a un estado de carga dado [kN/m ²]
λ^c	carga crítica teórica [kN/m ²]
ρ_{acero}	densidad del acero [kg/m ³]
$\{\sigma_0\}$	tensión resultante al aplicar el desplazamiento $\{u_0\}$ [kN/m ²]
φ	ángulo entre el radio a correspondiente a un punto sobre la superficie y una dirección como origen [°]

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto integrador profesional es analizar cómo afecta la reducción en espesor por corrosión y los asentamientos diferenciales de un tanque cortador de petróleo crudo al comportamiento estructural del mismo.

Como objetivos específicos se mencionan:

- Estudiar el tipo de tanque analizado, su composición, funcionamiento, los daños por corrosión y asentamientos asociados a la estructura.
- Analizar los ensayos disponibles: inspección visual externa, emisión acústica, ultrasonido, relevamiento topográfico realizado que permiten caracterizar el estado actual del tanque.
- Calcular los espesores iniciales y verificar el tanque en condiciones de servicio según normativas vigentes.
- Modelar el tanque en estado original y deformado mediante un software de elementos finitos, previa capacitación en el mismo.
- Analizar las variaciones en el comportamiento estructural ante reducciones en espesor y asentamientos diferenciales de la base.
- Presentar causas posibles de la deformación observada, la necesidad de evitar las mismas en la industria petrolera y estimar la vida útil de la estructura.

1.2 FUNDAMENTOS

Los tanques metálicos cortadores de petróleo crudo son uno de los componentes esenciales en el proceso productivo de la industria hidrocarburífera. Realizan la separación agua/petróleo utilizando una emulsión química. En las locaciones, los tanques se construyen sobre terraplenes para apoyo de la base de hormigón rodeados por recintos de contención. La vida útil de los tanques puede verse afectada por asentamientos de la base, provocados por errores de compactación en el suelo que conforma el terraplén, socavaciones por escurrimiento indebido de agua. También pueden producirse daños por el efecto corrosivo de la mezcla emulsiva que contienen en su interior. Por un lado, los asentamientos en la base de apoyo generan deformaciones importantes en la cáscara cilíndrica y por el otro, la corrosión genera una disminución progresiva del espesor de la misma. Dicha corrosión es variable en la altura del tanque y puntos de contacto con accesorios, existiendo lugares que superan en criticidad al resto.

La envolvente cilíndrica conforma la estructura resistente del tanque y las deformaciones provocadas generan que haya una respuesta diferente ante las cargas que lo solicitan. A su vez, las deformaciones pueden derivar en daño en algún lugar de la envolvente o del fondo del tanque con un posible derrame del producto interior y una posterior contaminación ambiental en la zona con distintos grados de intensidad. Un evento de este tipo puede generar pérdidas económicas, sociales y ambientales y las empresas operativas deben inspeccionar constantemente el estado de las instalaciones para evitarlo.

Diferentes autores han reportado la realización de estudios experimentales sobre cilindros o tanques de almacenamiento verticales y la influencia en las cargas de pandeo por la presencia de imperfecciones geométricas (Hornung y Saal, 2002; Paor et al, 2012). Jaca y Godoy (2008) realizaron estudios numéricos considerando no linealidad geométrica (GNLA) sobre tanques verticales colapsados bajo vacío y viento. Godoy y Sosa (2003) evaluaron el efecto de asentamientos localizados de apoyos sobre la pared de tanques de almacenamientos de petróleo y derivados de grandes dimensiones, mediante una metodología numérica y experimental. Jaca et al. (2013) estudiaron la respuesta de tanques horizontales frente a sollicitaciones generadas por la combinación de la acción de la presión hidrostática con presiones negativas provenientes de una maniobra inadecuada en el proceso de descarga del fluido o por un asentamiento diferencial de sus apoyos. Magnucki y Stasiewicz (2003) identificaron las relaciones entre espesor y radio que producen cargas críticas de pandeo.

El trabajo propuesto está basado en informes con los resultados de los ensayos de inspección visual externa y ultrasonido donde se midieron los espesores actuales a distintas alturas, en lugares puntuales de conexión de accesorios y en el techo. Se cuenta con el informe de un relevamiento topográfico in situ de las virolas que conforman el tanque mediante estación total generando un plano Autocad 3D con las coordenadas. Como complemento se obtuvieron mediciones de asentamientos. Por otro lado, siguiendo el procedimiento TankPac de emisión acústica, se obtuvieron resultados cualitativos de actividad total registrada en cuanto al daño acumulado por corrosión en el fondo. Los ensayos mencionados fueron realizados luego de observar un mal estado del tanque cortador y su base, a modo de verificación.

En el presente trabajo se plantea completar la evaluación del estado real del tanque en base a condiciones de servicio según normativa API. Para ello se modela el tanque en sus dos estados: original y deformado para obtener las diferencias en el comportamiento estructural ante las cargas que lo solicitan mediante el software ABAQUS (2006) de elementos finitos. Se implementa análisis de bifurcación lineal (LBA), análisis no lineal geométrico (GNLA) y análisis no lineal geométrico con imperfecciones (GNIA). Se evalúan configuraciones de deformadas y estado tensional, asociadas a estados críticos y poscríticos ante reducciones en espesor sumadas a la desnivelación de la base del tanque.

1.3 METODOLOGÍA

La metodología para alcanzar el objetivo propuesto, consiste en los siguientes pasos: (a) estudio de las técnicas y mediciones obtenidas en los respectivos ensayos no destructivos realizados, seleccionando los de mayor relevancia para el presente trabajo; (b) caracterizar la geometría de estudio, en función de dimensiones como diámetro, espesores y componentes estructurales, basadas en los datos establecidos en dichos informes; (c) realizar el análisis estructural en los casos inicial y deformado mediante un modelo de elementos finitos con el programa ABAQUS (2006); (d) identificar y definir variación en el comportamiento estructural ante el fenómeno corrosivo y asentamientos diferenciales de la base; (d) analizar los resultados, ordenarlos y concluir sobre la continuidad en servicio del tanque.

El estudio con ABAQUS (2006) comprende la evaluación de cargas críticas y formas de modo asociadas mediante bifurcación lineal (LBA) en una primera instancia para tener una referencia de los valores a los que pueden aparecer problemas de inestabilidad del equilibrio. Además, se realiza un Análisis No Lineal Geométrico (GNLA) y con Imperfecciones (GNIA) por el método de Riks (1972, 1979) para obtener una mejor evaluación de la respuesta de la estructura, exhibiendo el comportamiento poscrítico.

Las cargas de viento se evalúan mediante CIRSOC 102 (2005), basado en la norma australiana neozelandesa AS/NZS y se siguen los procedimientos de las normativas API 650 (2013) y API 653 (2013).

1.4 ÁMBITO DE DESARROLLO

El Proyecto Integrador Profesional involucra a los Departamentos de Ingeniería Civil y de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue. El trabajo consiste principalmente en la simulación numérica de un tanque en servicio, para el posterior procesamiento de los datos obtenidos, a fin de concluir sobre la gravedad del daño por corrosión y asentamientos diferenciales.

La motivación del trabajo surge por las actividades desarrolladas durante una pasantía donde se tomó contacto con la problemática a estudiar. El caso analizado es un tanque cortador real emplazado en la Provincia de Santa Cruz perteneciente a una empresa de la zona, que se encuentra actualmente en verificación. Se espera que el presente proyecto pueda ser utilizado como referencia al analizar la conveniencia y factibilidad económica de una posible reparación o reconstrucción total del tanque.

1.5 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo se divide en 7 capítulos. El capítulo 1 contiene los objetivos en cuanto al caso investigado. Además, se explican los fundamentos, metodología, ámbito de desarrollo y estructura del proyecto.

El capítulo 2 introduce las características de los tanques cortadores, sus amenazas, mecanismos de daño e intervalos de inspección. Se encuentra el marco conceptual para los siguientes capítulos y facilita la explicación de los resultados para las simulaciones computacionales.

Los capítulos 3 a 5 constituyen los capítulos centrales de esta tesis. El 3 y 4 resumen toda la información recopilada acerca del caso en estudio la cual se utiliza posteriormente para el modelado computacional. El capítulo 5 relata las características del software a utilizar y los procedimientos para representar la estructura en sus tres escenarios: inicial, deformado y futuro con los modelos obtenidos. Se analiza la influencia de la corrosión y los asentamientos diferenciales de forma aislada para posteriormente conocer el comportamiento de la estructura con los efectos combinados. Presenta los resultados en cada análisis realizado: lineal, no lineal geométrico, no lineal geométrico con imperfecciones y bifurcación lineal. Se obtienen configuraciones de deformadas, tensiones y trayectorias fundamentales asociadas a estados críticos y poscríticos.

Los capítulos 6 y 7 concluyen la investigación basándose en un análisis de riesgo que considera probabilidad, exposición y consecuencia y una de las temáticas fundamentales del ámbito profesional: sostenibilidad y responsabilidad social.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 TEORÍA DE CÁSCARAS

2.1.1 CÁSCARAS COMO ESTRUCTURAS

- Definición: estructura portante superficial curvada.
- Geometría de las cáscaras: la superficie media divide en cada punto el espesor de la cáscara en dos partes iguales. Dicho espesor es la distancia medida perpendicularmente a la superficie media existente entre las superficies interior y exterior que delimitan la cáscara.
- Hipótesis y suposiciones para cáscaras delgadas:
 - Se desprecian las tensiones normales perpendiculares a la superficie media.
 - Todos los puntos sobre una normal a la superficie media antes de la deformación permanecen sobre una recta después de ella.
 - Esta recta también es normal a la superficie media deformada.
 - La deformación es pequeña respecto al espesor (no se cumple si la cáscara es muy delgada).
- Geometría de las cáscaras de rotación: Como se muestra en la Figura 2.1, la superficie media se genera por rotación de una curva alrededor de un eje que se denomina eje de la cáscara. La red de líneas de curvatura aparece intersectando la superficie media con planos que en un caso contienen al eje de la cáscara (meridiano) y perpendiculares al eje (paralelo). Los planos en que estas curvas cortan con la superficie media se denominan secciones meridianas y paralelas.

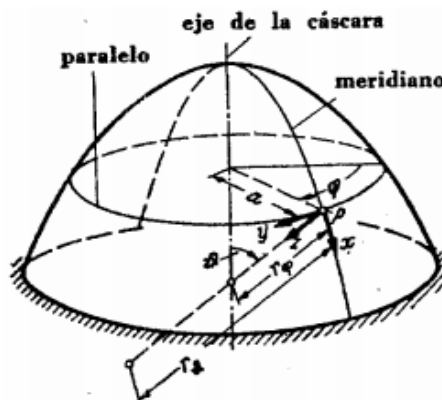


Figura 2.1: Denominaciones de la cáscara de revolución¹.

¹ Fuente: Alf Pflüger (1959). Estática Elemental de las Cáscaras. Editorial EUDEBA; tercera edición. Pág.17.

Siendo P un punto cualquiera de la superficie media se denomina $r\theta$ al radio de la curvatura del meridiano, $r\varphi$ a la longitud de la normal a la cáscara desde el punto P hasta el eje de la cáscara, a al radio de curvatura del paralelo, θ al ángulo entre el eje de la cáscara y la normal de la cáscara y φ al ángulo entre el radio a correspondiente al punto P y una dirección como origen, elegida en cada caso.

Las cargas que se consideran en el análisis son el peso propio, presión de nieve y presión de viento.

- Características: Para dimensionar la estructura es necesario conocer las tensiones originadas por la carga. Se observa en la Figura 2.2 la distribución de las fuerzas en secciones que se realizan a lo largo de un meridiano y un paralelo, perpendicularmente a la superficie media.

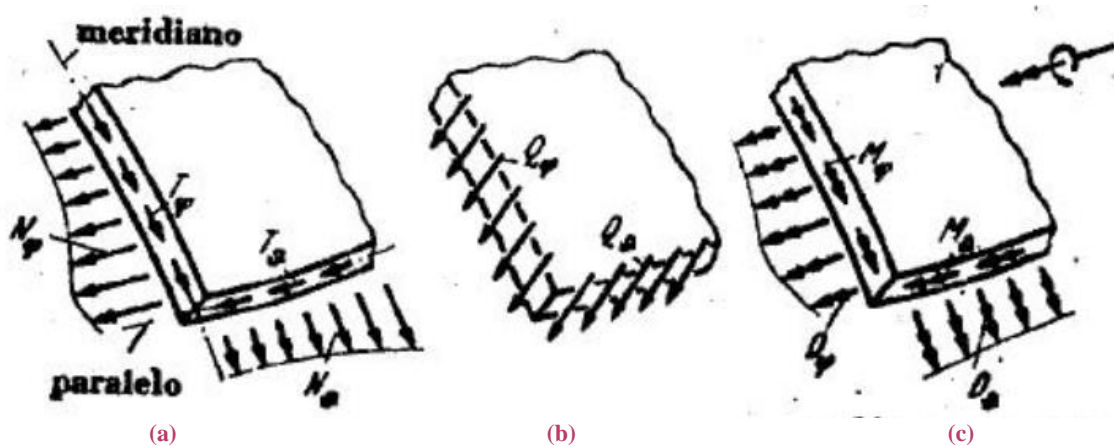


Figura 2.2: Características de las cáscaras de rotación normales: a) Fuerzas normales y fuerzas tangenciales repartidas, b) Fuerzas de corte repartidas, c) Momentos flectores y momentos torsores uniformemente repartidos.²

Dónde:

- N_θ y N_φ son fuerzas normales por unidad de longitud en dirección de meridianos y paralelos respectivamente,
- T_θ y T_φ son fuerzas tangenciales por unidad de longitud (se encuentran contenidas en la superficie media en dirección de paralelos y meridianos respectivamente,
- Q_θ y Q_φ son fuerzas de corte por unidad de longitud (son perpendiculares a la superficie media),
- M_θ y M_φ son momentos flectores alrededor de paralelos y meridianos por unidad de longitud,

² Fuente: Alf Pflüger (1959). Estática Elemental de las Cáscaras. Editorial EUDEBA; tercera edición. Pág.22.

- D_θ y D_φ son momentos torsores en meridianos y paralelos por unidad de longitud.
- Hipótesis del estado de tensiones membranal: en general no es posible determinar todas las características partiendo solamente de las condiciones de equilibrio, ya que la distribución de las fuerzas en cáscaras es estáticamente indeterminada. Como esta indeterminación aparece para cada elemento de la cáscara, independientemente de su condición de sustentación, se denomina a la cáscara “estáticamente indeterminada interiormente”. Por consiguiente, para solucionar este problema de cáscaras, debe incluirse en las consideraciones el estado de deformación.
- Teoría de flexión: La teoría membranal solo es aplicable para condiciones de borde convenientes y deja de tener validez cuando hay cargas concentradas perpendiculares a la superficie media. Para evitar las contradicciones en las condiciones de equilibrio que aparecen en dichos casos se desarrolla la teoría de flexión donde los momentos flectores juegan un papel preponderante. Como el estado de fuerzas es estáticamente indeterminado, para su cálculo debe considerarse las deformaciones de la cáscara. Tales magnitudes son frecuentemente los corrimientos de un punto de la superficie media de la cáscara. Deben emplearse las dilataciones de la superficie media y la rotación de la tangente meridiana. Se utiliza la Ley De Hooke y la integración de los esfuerzos en el espesor de la cáscara para establecer las relaciones entre deformaciones y tensiones de las dilataciones. Así se obtienen las tensiones en función de los esfuerzos característicos y espesor t :

$$S_{11} = \frac{N_\varphi}{t} - \frac{M_\varphi}{t^3} z, \quad (2.1)$$

$$S_{22} = \frac{N_\theta}{t} + \frac{M_\theta}{t^3} z. \quad (2.2)$$

Dónde:

- S_{11} son las tensiones en dirección de los paralelos,
- S_{22} son las tensiones en dirección de los meridianos,
- t es el espesor de la cáscara,
- z coordenada sobre el eje en dirección de la normal a la cáscara.

2.1.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Un sistema estructural está formado por una estructura y las cargas que actúan sobre ella. Hay dos propiedades principales que hacen que la estructura resista las cargas: el material constitutivo y la forma geométrica. Cada estructura está diseñada con una forma específica y se espera que mantenga la misma durante su vida útil.

El pandeo es un proceso mediante el cual una estructura no puede resistir las cargas que la solicitan con su forma original por lo cual debe cambiarla para encontrar una nueva

configuración en equilibrio. En ingeniería este proceso no es deseable y ocurre para una magnitud de carga definida. Las consecuencias son mayormente geométricas: grandes desplazamientos en la estructura que provocan cambios en su forma y consecuencias en el material que pueden inducir plasticidad en las paredes de la estructura, como se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3: Pandeo de tanques: (a) Falla por Huracán Katrina, Fish Oil, Port Sulphur (2005), (b) Falla por viento en etapa constructiva, Patagonia Argentina (2001), (c) Falla por descenso en apoyo, Puerto Rico (2010), (d) Falla por corrosión.

El proceso no está solamente asociado a la estructura sino al sistema estructural completo. Para visualizarlo es necesario considerar los diagramas de carga-desplazamiento ($P-\Delta$) como se muestran en la Figura 2.4. Allí se muestran los estados de equilibrio de la estructura en términos de la carga aplicada (P) y desplazamientos (Δ) obtenidos. Es claro que hay deflexiones en cada punto de la estructura. Por ello es necesario elegir un punto conveniente y seguir el proceso mediante la observación de los desplazamientos de ese punto específicamente.

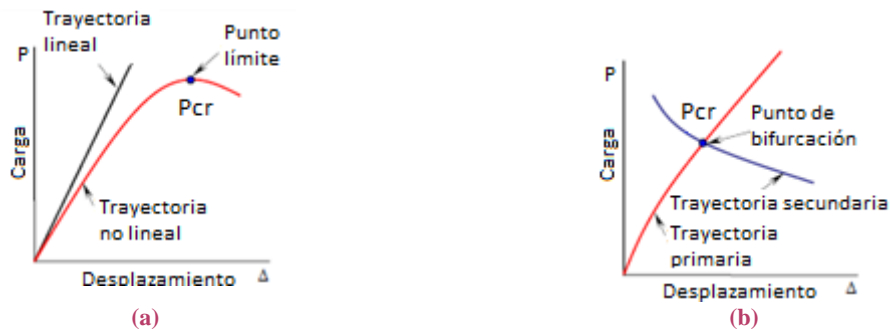


Figura 2.4: Diagramas carga deformación mostrando trayectorias de equilibrio (a) punto crítico, y (b) punto de bifurcación.

La secuencia de los puntos de equilibrio en los diagramas anteriores se conoce como trayectoria de equilibrio. La que surge de la configuración descargada se denomina trayectoria fundamental o primaria, también trayectoria pre-pandeo. La misma puede ser lineal (o casi lineal) o no lineal dependiendo del sistema estructural.

La carga máxima en la que ocurre un cambio en la forma geométrica se denomina carga de pandeo o carga crítica, y la geometría obtenida modo de pandeo. El proceso de pandeo puede ser pandeo inesperado (snap buckling) o pandeo de bifurcación (bifurcation buckling). En el pandeo inesperado la trayectoria fundamental es no lineal, alcanza una carga máxima (P_{cr}) y la tangente a la trayectoria es horizontal. Este estado se denomina punto límite (Figura 2.4 (a)) y el cambio en la forma ocurre de manera violenta. En el pandeo de bifurcación, la trayectoria fundamental se cruza con otra trayectoria de equilibrio poscrítica (secundaria), que no estaba presente en el origen del proceso de carga (Figura 2.4 (b)). El estado en el que ambas trayectorias se intersecan se llama punto de bifurcación. Tanto el punto límite como el de bifurcación se llaman puntos críticos o estados críticos.

Muchas veces existen casos donde hay dos modos asociados a la misma carga crítica, esto se conoce como estado crítico coincidente o también conocido como punto crítico compuesto. Esta situación se muestra en la Figura 2.5.

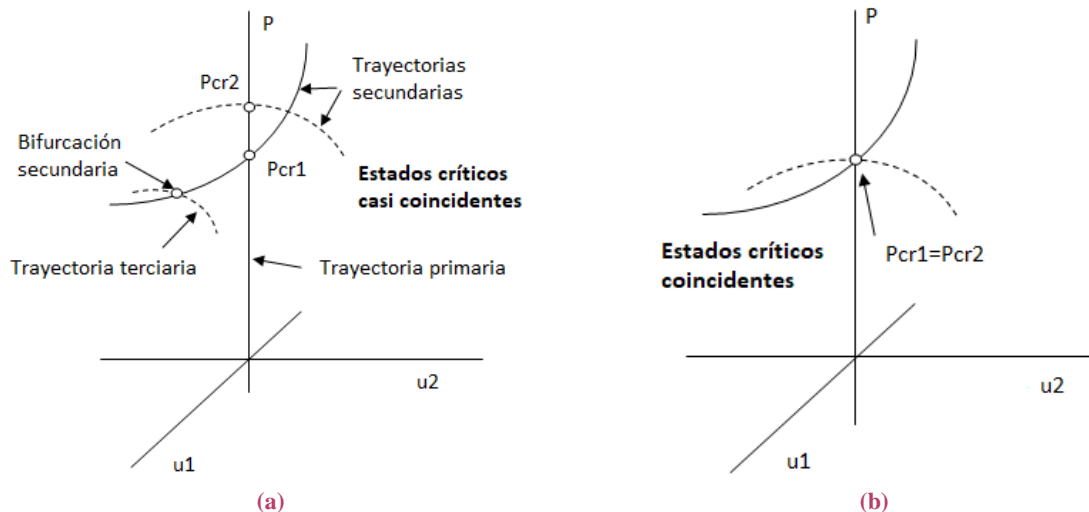


Figura 2.5: Estados críticos: (a) Casi coincidentes y con bifurcación secundaria, (b) Coincidentes: dos o más modos críticos asociados a la misma carga crítica.

El caso de cargas críticas casi coincidentes se presenta en la Figura 2.5 (a) mientras que las cargas críticas coincidentes se muestran en la Figura 2.5 (b). Hay dos razones que explican dicha situación:

- Dada la selección de algunos parámetros de diseño dos modos que podrían tomar diferentes valores de carga crítica pueden resultar coincidentes. En este caso la coincidencia es la excepción y no la regla.

- Dado un problema estructural y de carga considerada. Por ejemplo, cáscaras cilíndricas bajo cargas axiales o esféricas bajo presión uniforme externa (dos geometrías usuales en el diseño de los tanques) desarrollan varios modos coincidentes para el estado crítico más bajo. Aquí no importa cómo se diseñe la envolvente tendrá estados críticos coincidentes siendo la regla y no la excepción.

Dos o más estados críticos coincidentes pueden tener una forma de acoplamiento de modos para formar una nueva trayectoria de equilibrio, diferente de las anteriores. Por ejemplo, en la Figura 2.5 (a) el acoplamiento de dos modos produce una segunda bifurcación y una tercera trayectoria de equilibrio.

En muchos casos en el estado crítico la estructura tiene un modo crítico y mientras que sigue la trayectoria de equilibrio poscrítica los modos de deformación cambian. Esto se llama salto de modo.

El pandeo está asociado a una propiedad de los estados de equilibrio conocida como estabilidad. Un estado de equilibrio estable es aquel en el cual, si hay una pequeña perturbación al sistema en el mismo nivel de carga, entonces el sistema oscila hasta regresar luego de un tiempo a su estado original. Si el sistema no regresa a dicho estado y se mueve hacia uno nuevo, tal vez lejano al original, entonces el original era un estado de equilibrio inestable. En un punto crítico, la estabilidad cambia de estable a inestable.

El proceso que ocurre después del pandeo se llama poscrítico. Existen estructuras con capacidad de carga en su comportamiento poscrítico, ya que pueden adaptarse a los cambios de forma y resistir cargas adicionales después del pandeo. Por lo tanto, hay una trayectoria de equilibrio poscrítica que puede ser estable. Otras estructuras no tienen estados de equilibrio poscrítico estables por lo cual la carga crítica es la carga máxima de la estructura.

Koiter (1945) desarrolló una teoría general de estabilidad para sistemas elásticos continuos que permitió explicar y clasificar la mecánica del pandeo. Mostró la existencia de los diferentes tipos de estados críticos de bifurcación los cuales se muestran en la Figura 2.6:

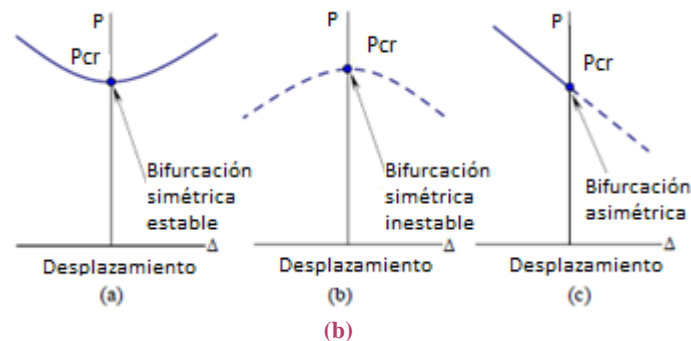


Figura 2.6: Tres tipos de bifurcación para modos aislados, (a) Bifurcación simétrica estable, (b) Bifurcación

simétrica inestable, (c) Bifurcación asimétrica inestable.

2.1.3 ANÁLISIS DE BIFURCACIÓN LINEAL (LBA)

El análisis de bifurcación lineal consiste en el planteo de un problema de autovalores y autovectores. Permite obtener las cargas críticas y modos críticos asociados como primera aproximación a los valores a los que pueden aparecer problemas de inestabilidad del equilibrio.

Se asume que la respuesta antes de la deformación es esencialmente lineal y se ignoran así en el análisis todas aquellas no linealidades y propiedades inelásticas. El método está destinado a las estructuras que tienen poca deformación previa al pandeo aunque muchas veces antes de colapsar existen respuestas inelásticas.

Para desarrollar el problema se debe resolver la ecuación carga-desplazamiento para un estado lineal de pre-pandeo $\{P_0\}$:

$$\{P_0\} = [Ke] * \{u_0\} \quad (2.3)$$

donde $\{u_0\}$ son los desplazamientos resultantes de la carga aplicada $\{P_0\}$, y $[Ke]$ es la matriz de rigidez lineal del sistema. Se denomina $\{\sigma_0\}$ a la tensión resultante al aplicar el desplazamiento $\{u_0\}$. Asumiendo que los desplazamientos en el pre-pandeo son pequeños, la ecuación de equilibrio incrementada en un estado arbitrario $\{P\}$, $\{u\}$ y $\{\sigma\}$ viene dada por:

$$\{\Delta P\} = [[Ke] + [K_\sigma(\sigma)]] * \{\Delta u\} \quad (2.4)$$

donde $\{\sigma\}$ es la tensión resultante al aplicar el desplazamiento $\{u_0\}$. $[K_\sigma(\sigma)]$ es la matriz de estado inicial evaluada en el estado tensional $\{\sigma\}$, también conocida como matriz de carga-geometría.

Asumiendo que el comportamiento pre-pandeo es una función lineal de la carga aplicada $\{P_0\}$ y considerando el factor de proporcionalidad (λ) asociado a un estado de carga dado, se tiene:

$$\{P\} = \lambda * \{P_0\} \quad (2.5)$$

$$\{u\} = \lambda * \{u_0\} \quad (2.6)$$

$$\{\sigma\} = \lambda * \{\sigma_0\} \quad (2.7)$$

De esta manera resulta que la matriz de rigidez correspondiente al estado inicial también presenta proporcionalidad y resulta:

$$[K_{\sigma}(\sigma)] = \lambda \cdot [K_{\sigma}(\sigma_0)] \quad (2.8)$$

Así, la ecuación de equilibrio incrementada y expresada para el rango completo de pre-pandeo resulta:

$$\{\Delta P\} = [[K_e] + \lambda \cdot [K_{\sigma}(\sigma_0)]] \cdot \{\Delta u\} \quad (2.9)$$

Al producirse la inestabilidad para un estado de carga $\{P_{cr}\}$, la estructura puede mostrar desplazamientos $\{\Delta u\}$ en el caso de que $\{\Delta P\} \approx 0$. Al sustituir la expresión anterior en la Ecuación (2.9) de equilibrio incremental del rango de pre-pandeo, se obtiene:

$$[[K_e] + \lambda \cdot [K_{\sigma}(\sigma_0)]] \cdot \{\Delta u\} = 0 \quad (2.10)$$

La expresión anterior representa el problema clásico de autovalores. Para poder satisfacer la relación anterior se debe tener:

$$\det[[K_e] + \lambda^c \cdot [K_{\sigma}(\sigma_0)]] = 0 \quad (2.11)$$

Donde λ^c es el autovalor que define el estado de carga crítico $\{P_{cr}\}=\lambda^c \cdot \{P\}$ y $\{\Delta u\}=\phi^c$ que define la forma de modo asociada es el autovector correspondiente.

Al plantear un modelo de elementos finitos de n grados de libertad las ecuaciones anteriores permiten obtener un polinomio de orden enésimo en λ (los autovalores). Los autovectores $\{\Delta u\}_n$ en este caso representan la deformación superimpuesta sobre el sistema durante el pandeo. La carga crítica elástica $\{P_{cr}\}$ está dada para el valor más bajo calculado.

2.1.4 ANÁLISIS NO LINEAL GEOMÉTRICO (GNLA)

La pérdida de estabilidad estructural puede deberse a las siguientes causas:

- No-linealidades del material,
- No-linealidades geométricas,
- No linealidades de contacto (desplazamientos dependientes de condiciones de contorno),
- Mecánica de la fractura (comportamiento y desarrollo de grietas en el material).

Dichas situaciones provocan que las ecuaciones de equilibrio mencionadas anteriormente tengan un comportamiento no-lineal. En el Método de Elementos Finitos esto

queda representado porque la matriz de rigidez global $[K]$ del sistema varía al aplicar las cargas externas.

Las estructuras de cáscaras son muy sensibles al pandeo por su pequeño espesor. Cuando sufren el mismo se generan abolladuras importantes entrando el material de la estructura en un comportamiento elastoplástico. En ese momento, los desplazamientos no son despreciables en comparación con el espesor de la envolvente. La geometría de los elementos varía con la actuación de las fuerzas exteriores dejando de aproximarse las deformaciones linealmente a infinitesimales de primer orden. Así, deben considerarse los términos de segundo orden en las relaciones entre deformaciones y desplazamientos planteando el equilibrio en la posición deformada de la estructura. El análisis con el efecto de la plastificación es no lineal y se utiliza para investigar el comportamiento post-pandeo. Cuando un incremento en la deformación causa un descenso en la carga correspondiente el comportamiento de la estructura es inestable.

En esta instancia de post-pandeo se utiliza el Método de Riks modificado para el análisis numérico. Con el mismo se predice la inestabilidad y colapso geoméricamente no lineal de una estructura. Los problemas estáticos de no linealidad geométrica muchas veces incluyen pandeo o comportamiento de colapso, donde la respuesta carga-desplazamiento muestra rigidez negativa y la estructura debe liberar energía tensional para mantener el equilibrio. El método de Riks usa la magnitud de la carga como una incógnita adicional; se resuelve simultáneamente para cargas y desplazamientos. Para problemas de inestabilidad la respuesta carga-desplazamiento puede exhibir el tipo de comportamiento que muestra la Figura 2.7. Esto es, durante periodos de respuesta, la carga y/o el desplazamiento puede decrecer mientras la solución evoluciona. El método obtiene soluciones de equilibrio controlando en cada incremento la curva incluso en casos de respuestas complejas e inestables.

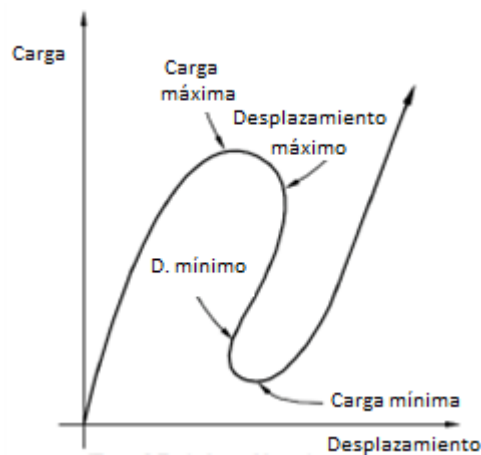


Figura 2.7: Respuesta típica estática inestable.

El método asume que las magnitudes de todas las cargas actuantes varían proporcionalmente con un factor escalar y que la respuesta es razonablemente suave, es

decir, que no se producen bifurcaciones súbitas. La esencia del método es que la solución es considerada como la búsqueda de una trayectoria de equilibrio individual en un espacio definido por las variables nodales y el parámetro de carga. El algoritmo sigue los principios del método de Newton; se caracteriza por el uso de una medida de longitud de arco que sirve como parámetro de control cuando se recorre la trayectoria de equilibrio del sistema analizado.

El incremento en la trayectoria es delimitado por el recorrido hecho a lo largo de una línea tangente a un punto de partida conocido y por la búsqueda de un estado de equilibrio en dirección a una línea ortogonal a la tangente mencionada, que pasa por el punto de interés.

El patrón de carga es P^N donde N son los grados de libertad del modelo. La magnitud del parámetro de carga es λ , entonces en cualquier instante el estado de carga real es $\lambda.P^N$, y u^N los desplazamientos correspondientes.

El espacio de la solución se escala para que las dimensiones sean del mismo orden de magnitud en cada eje. Esto se logra midiendo el valor máximo absoluto de todas las variables de desplazamiento (\bar{u}) en la iteración inicial (lineal). Las cargas y desplazamientos en el plano escalado se determinan mediante las siguientes expresiones:

$$\lambda \tilde{P}^N = \lambda P^N / \bar{P} \quad (2.12)$$

$$\bar{P} = (P^N P^N)^{1/2} \quad (2.13)$$

$$\tilde{u}^N = u^N / \bar{u} \quad (2.14)$$

La trayectoria de la solución es entonces el conjunto continuo de puntos de equilibrio descritos por el vector $(\tilde{u}^N; \lambda)$ en este espacio escalado. Todos los componentes de este vector son de orden uno. El algoritmo se muestra en la Figura 2.8 y se describe a continuación.

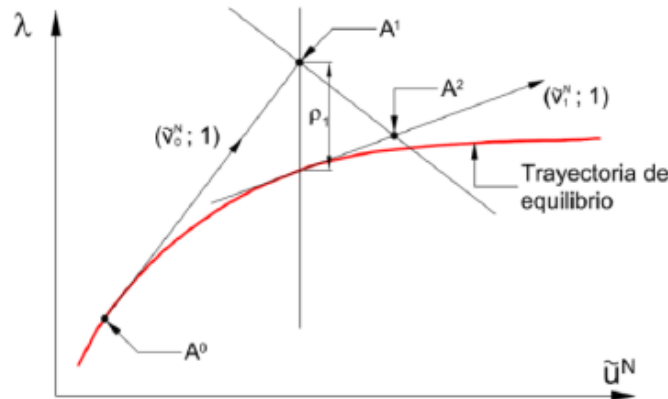


Figura 2.8: Algoritmo modificado de Riks.

El algoritmo supone que la solución es conocida en el punto A^0 de coordenadas $(\tilde{u}^N; \lambda_0)$. La matriz de rigidez tangente K_0^{NM} es calculada para la configuración inicial y luego resuelve la siguiente ecuación:

$$K_0^{NM} v_0^M = P^N \quad (2.15)$$

El tamaño del incremento $(\Delta\lambda)$ para avanzar del punto A^0 al punto A^1 se calcula en base a $\tilde{v}_0^N = \tilde{v}_0^M / \bar{u}$, se elige de una longitud de la trayectoria (Δl) sugerida inicialmente en el espacio de la solución, de modo que:

$$\Delta\lambda_0 = \pm \frac{\Delta l}{(\tilde{v}_0^N \cdot \tilde{v}_0^N + 1)^{1/2}} \quad (2.16)$$

El signo de $\Delta\lambda_0$ (la dirección de respuesta a lo largo de la línea tangente) se elige de manera que el producto escalar del vector $\Delta\lambda_0 (\tilde{v}_0^N, 1)$ en la solución para el incremento anterior $(\Delta\tilde{u}_{-1}^N; \Delta\lambda_{-1})$ sea positivo:

$$\Delta\lambda_0 (\tilde{v}_0^N \Delta\tilde{u}_{-1}^N + \Delta\lambda_{-1}) > 0 \quad (2.17)$$

El nuevo punto A^1 tiene coordenadas $(\tilde{u}_0^N + \Delta\lambda_0 \tilde{v}_0^N, \lambda_0 + \Delta\lambda_0)$. La solución luego se corrige con respecto a la trayectoria de equilibrio a través de un plano ortogonal al vector que pasa por el punto A^1 . Esto hace que la búsqueda de equilibrio sea ortogonal a la última tangente, y no tangente al comienzo del incremento. La solución representa un punto sobre la trayectoria de equilibrio de la estructura.

2.1.5 ANÁLISIS NO LINEAL GEOMÉTRICO CON IMPERFECCIONES (GNIA)

Como el comportamiento post pandeo puede volverse inestable es muy importante investigar la influencia de las imperfecciones en la capacidad de carga de la estructura.

Las imperfecciones están presentes en todas las estructuras reales y pueden ser desviaciones geométricas de la forma perfecta, excentricidades de carga, cambios locales en las propiedades y otras. Usualmente se caracterizan por su variación en el espacio y amplitud.

Una imperfección destruye un punto de bifurcación y se obtiene una nueva trayectoria de equilibrio para cada amplitud de imperfección. Como dicha amplitud aumenta, la trayectoria se desvía cada vez más de la del sistema perfecto como se muestra en la Figura 2.9:

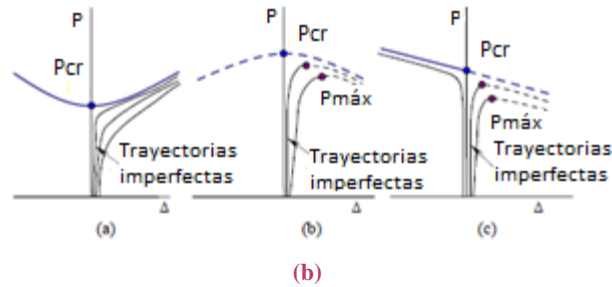


Figura 2.9: Influencia de las imperfecciones en el comportamiento de bifurcación de los sistemas estructurales, (a) Bifurcación simétrica estable, (b) Bifurcación simétrica inestable, (c) Bifurcación asimétrica inestable.

Una consecuencia de estas inevitables imperfecciones es que la fuerza axial puede causar pandeo aunque tenga un valor menor que la carga crítica. Por ello para obtener información correcta del comportamiento post pandeo es importante considerarlas.

Para analizar el comportamiento de la estructura en fase poscrítica, el problema de bifurcación de equilibrio debe transformarse en un problema de respuesta continua. Este efecto puede conseguirse introduciendo una imperfección inicial en la geometría perfecta de la estructura con lo que se consigue una respuesta en el modo de pandeo antes de que se alcance la carga crítica. Las imperfecciones se introducen con perturbaciones de la geometría inicial como superposición de los modos de pandeo determinados anteriormente mediante un análisis de autovalores. En este caso, la reducción de espesores producida por corrosión se presenta como imperfecciones geométricas en la evaluación de la respuesta de la estructura frente a descenso de apoyos y la acción del viento.

Así, el método de Riks puede usarse para estudiar el comportamiento postcrítico de estructuras mediante análisis carga-desplazamiento, en las que aparecen otros efectos no lineales como la no linealidad del material.

2.2 TANQUES CORTADORES

Los tanques cortadores se utilizan para separar el agua libre del petróleo en las plantas de tratamiento de crudo (PTC). A pesar de ser equipos de gran tamaño, con altos costos de inversión y mantenimiento, su uso sigue siendo generalizado, pues presentan ventajas como la flexibilidad y la capacidad de operar con importantes volúmenes de sólidos sin que se vea afectado su funcionamiento. El desempeño del tanque se evalúa determinando la cantidad de crudo en la salida de agua, la altura de la capa densa y la distancia que hay entre la salida de crudo y la interfase, donde se considera que está la separación entre la emulsión y la zona de crudo en especificación.

Se hallan dos diseños típicos: uno con internos del tipo platos y distribución de fluidos a través de la columna central (Figura 2.10 (a)), y otro con distribuidores tipos “araña”, platos pequeños y un anillo (Figura 2.10 (b)). En general, los tanques con internos

de platos procesan crudos livianos y altos contenidos de agua, mientras que los tanques con internos tipo araña procesan crudos pesados y bajos cortes de agua.

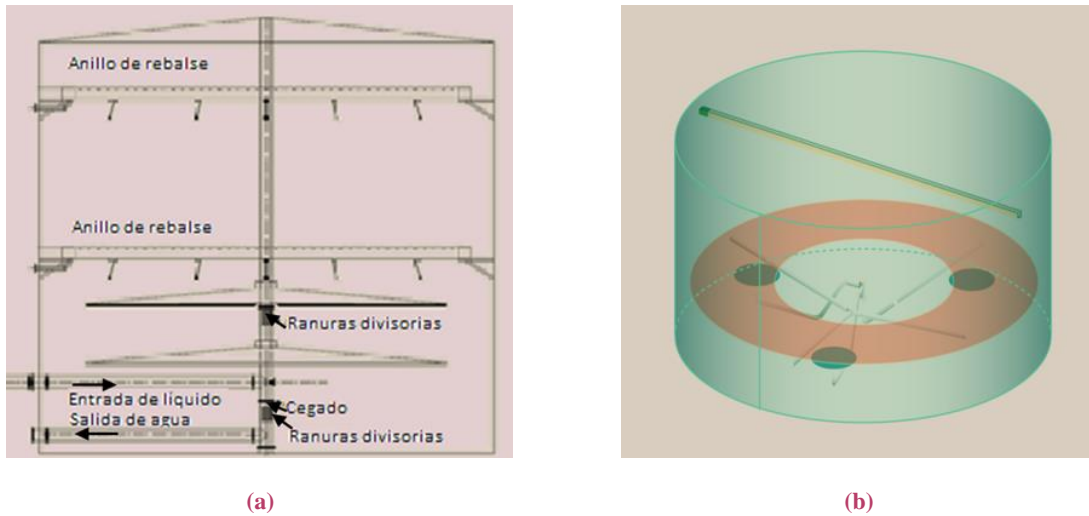


Figura 2.10: (a) Esquema del tanque con internos del tipo platos, (b) esquema del tanque con internos tipo araña.³

Los platos se conocen como placas deflectoras. Los mismos presentan dientes en los extremos y la función es ayudar a romper la emulsión y facilitar la separación de las gotas de hidrocarburo y agua. Esto se logra llevando el fluido de ingreso a ascender justo por debajo de los platos y chocando con los mismos. En la Figura 2.11 se muestra la tipología de placas deflectoras dispuestas del tipo araña, siendo análogo el formato de las mismas para la disposición tipo platos.



Figura 2.11: Tipologías de placas deflectoras tipo arañas.

³ Fuente: Raviculé M., Mognol G. (2019). Y-TEC. Editorial Talleres Trama; quinceava edición. Pág.61 y 62.

2.3 AMENAZAS Y MECANISMOS DE DAÑO

2.3.1 GENERALIDADES

Una amenaza a la integridad es por definición toda fuente potencial de daño sobre las estructuras, que pueda derivar en un evento indicador de pérdida de contención de fluido. Para identificar las amenazas se considera y analiza toda la información disponible respecto al diseño, información operacional, entorno, experiencia del personal especializado y medidas de mitigación previstas. Se examinan sistemáticamente todas las amenazas que generen desvíos de la condición normal de operación y se evalúa si las medidas de mitigación propuestas son adecuadas para minimizar los eventos peligrosos a lo largo de la vida útil.

Las amenazas y mecanismos básicos que pueden afectar la integridad de los tanques se clasifican en:

- a) Defectos de fabricación (incluye montaje):
 - Soldaduras defectuosas,
 - Material defectuoso,
 - Tratamiento térmico inadecuado,
 - Tolerancia dimensional inadecuada,
 - Instalación inadecuada,
 - Ajuste inadecuado.
- b) Corrosión, fisuras, erosión, fatiga.
- c) Fuerzas naturales.
- d) Humanas:
 - Operaciones incorrectas,
 - Daños por terceros.

Particularmente para el caso en estudio se profundiza sobre:

- a. Corrosión,
- b. Descenso de la base de apoyo por socavación natural del terraplén.

2.3.2 CORROSIÓN

La corrosión es un mecanismo de daño en el cual se produce el deterioro de las instalaciones, normalmente está considerada en el diseño del componente a través de un sobreespesor, que considera la pérdida homogénea de espesor. Además, se consideran protecciones o recubrimientos adicionales en el componente para disminuir esta pérdida de material.

En el caso de los tanques hay diferentes tipos de corrosión (atmosférica, microbiológica, bajo suelo, bajo aislación, galvánica, por gases disueltos, por rendijas (crevice), bajo tensión). En la corrosión microbiológica los microorganismos más importantes que influyen directamente en el índice de corrosión metálica son las bacterias sulfato reductoras encontradas en muchos suelos y aguas. Se encuentran generalmente en ambientes acuosos donde el fluido se estanca o la velocidad de flujo es muy baja. Hay muchas especies y variedades de estas bacterias, pero todas tienen una característica común: utilizan el hidrógeno para reducir el sulfato contenido en el agua y/o los suelos. La bacteria que reduce el sulfato consume hidrógeno, de esta manera aumenta la velocidad de corrosión. La reducción del sulfato da lugar a la formación de ácido sulfúrico; lo cual a su vez, causa más corrosión. La corrosión bajo suelo es típica de los asentamientos de los tanques y se refiere al deterioro de los metales expuestos a suelos. Depende de la temperatura de operación del equipo, disponibilidad de humedad y oxígeno en la interfaz metal-suelo, resistividad, tipo de suelo y homogeneidad (variaciones de tipos de suelo, edad y condición de suelo y de la instalación). La morfología de daño se presenta principalmente como reducción de espesor tipo picadura sobre el metal o como pobres condiciones de recubrimiento.

Las protecciones permiten disminuir o retardar el daño en los tanques. Se utilizan recubrimientos anticorrosivos, protección catódica o inyección de químicos. Debido a que los sistemas de recubrimiento tienen una expectativa de vida generalmente menor a la vida de diseño de la estructura que protegen para extender la misma son empleados sistemas complementarios de protección: protección catódica e inyección de químicos.

Recubrimientos internos y externos

Protegen la integridad estructural del tanque al prevenir la corrosión interna. Estos recubrimientos por lo general deben tener una vida de diseño de al menos 10 años para los tanques de gran capacidad. El sistema de pintado adecuado debe estar en función de la localización en el interior del tanque: fondo del tanque, capa de agua, exposición al producto almacenado, zona de vapores y estructura del techo. Adicionalmente, se utilizan para mantener la pureza del producto almacenado. A menudo, la superficie interna del fondo del tanque debe ser capaz de evitar los efectos de los movimientos de lodos provocados por corrientes internas o bien por acciones mecánicas. Previo a la aplicación se sigue un tratamiento superficial en la estructura y luego se procede a pintarla.

Protección catódica

Puede ser por ánodos de sacrificio o corriente impresa. Los ánodos se fabrican con aleaciones base magnesio, cinc o aluminio. Van instalados y sujetos mediante bulones o soportes metálicos soldados directamente a la superficie del recipiente o a una contrabrida. Los sistemas por corriente impresa se basan en la corriente suministrada por una fuente de

corriente continua. El negativo de la fuente se conecta al recipiente mientras que el positivo se conecta a un lecho anódico compuesto por ánodos de hierro-silicio, titanio u óxido de metales (MMO) colocados dentro del recipiente y aislados del mismo. La selección del tipo de protección a utilizar deberá justificarse técnicamente según:

- a. Composición del agua
- b. Posibilidad de contaminar agua potable
- c. Magnitud de la corriente requerida
- d. Disponibilidad de energía eléctrica
- e. Disponibilidad de espacio
- f. Costos de instalación, operación y mantenimiento

Productos químicos

Se inyectan productos químicos y pueden acompañar todo el ciclo de vida de las instalaciones. La dosificación se utiliza como protección complementaria ante posibles imperfecciones y/o daños de los sistemas de recubrimiento.

2.3.3 ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES DE APOYOS

Las cimentaciones constituyen el sustento para la estabilidad de las obras y se diseñan fijando parámetros con ciertos valores límites para resistir las deformaciones, pero en la práctica se construye en lugares complejos y los fenómenos (naturales y artificiales) provocan un comportamiento del suelo que difiere de las condiciones previstas. De esta forma se afecta la seguridad operacional y por ello las estructuras requieren tolerancias mínimas en las deformaciones (asentamientos y desplazamientos horizontales) para su funcionamiento y estabilidad.

El asentamiento de un tanque es el resultado de cualquiera o una combinación de:

- Asentamiento uniforme: depende de las características del suelo y no induce esfuerzos en la estructura del tanque, pero puede afectar conexiones,
- Asentamiento con inclinación plana: rota en un plano inclinado, causa un incremento en el nivel de líquido en la zona más baja y por lo tanto un incremento del esfuerzo en el cuerpo del tanque,
- Asentamiento diferencial (fuera del plano): se muestra en la Figura 2.12, como es flexible, es más probable que el cuerpo se asiente en una configuración, no plana, induciendo esfuerzos adicionales en el cuerpo. Generan una falta de circularidad en la parte superior del tanque y genera esfuerzos adicionales sobre la envolvente. Afecta a las conexiones que tengan cañerías conectadas a ellas. Es el más frecuente y por lo tanto es el componente más importante para determinar y evaluar de qué manera se asegura la integridad estructural del cuerpo y del fondo.

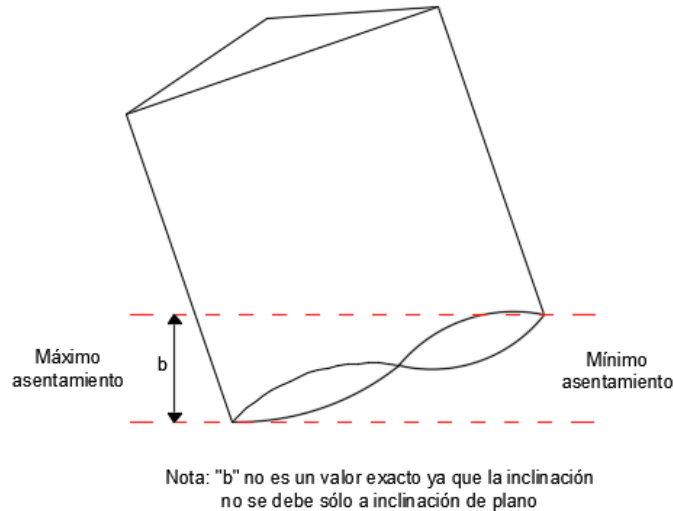


Figura 2.12: Esquema asentamiento diferencial de apoyos.

Los asentamientos de la base de los tanques fueron de gran preocupación en el pasado y muchos colapsos se atribuyen a esta causa. El ángulo central en la base de la cáscara es el parámetro principal del problema y el parámetro de control es la amplitud máxima del asentamiento mientras que la respuesta se mide en términos de los desplazamientos fuera del plano.

Anteriormente, los estudios se llevaban a cabo con una formulación lineal geométrica a pesar de que se trataba de desplazamientos de gran amplitud. Se identificaban los ángulos asociados a los desplazamientos radiales máximos. En estos estudios la longitud de arco para lo cual los desplazamientos ocurrían era variable. Se observó que había un valor para el arco (asociado al número de onda) para el cual el desplazamiento radial alcanzaba un máximo. Si el arco es muy corto, la estructura puede tomar los asentamientos con pequeños desplazamientos radiales, pero hay un arco central para el cual los desplazamientos son máximos. Esto dio indicio para investigar la respuesta no lineal de la cáscara.

Los resultados con ambos tipos de análisis coinciden aproximadamente para un pequeño rango de valores del asentamiento vertical (del orden del espesor de la cáscara). Cuando crece el asentamiento los máximos desplazamientos fuera del plano se alejan significativamente de la solución lineal. Dicho comportamiento es típico del pandeo de una cáscara en un comportamiento simétrico estable. Las diferencias entre las trayectorias de equilibrio lineales y no lineales sugirieron que podía haber un comportamiento de bifurcación asociado al asentamiento.

Se observa una corta trayectoria de equilibrio fundamental previo a que el pandeo de origen a una nueva forma de la cáscara. En la nueva configuración estable la cáscara puede resistir más desplazamientos verticales con un aumento de la amplitud del modo post

pandeo. Dada la importancia del efecto, deben evaluarse las amplitudes de los desplazamientos fuera del plano que resultan mayores que los verticales por asentamiento.

2.4 PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN

Cuando los resultados de la inspección de un tanque muestran que ha ocurrido un cambio desde la condición física original, se realiza una evaluación para determinar su estado para continuar en servicio.

Factores a considerar:

- Corrosión interna y externa,
- Niveles de esfuerzos actuales y permitidos,
- Propiedades del producto almacenado,
- Temperaturas de diseño del metal,
- Cargas exteriores,
- Análisis químicos y propiedades mecánicas,
- Distorsiones de tanque existente,
- Condiciones de funcionamiento.

Los factores mencionados no son para todas las situaciones y no pueden sustituir un análisis de ingeniería y el criterio requerido para cada situación.

INSPECCIÓN

Todos los tanques deben tener una inspección interna formal conducida en los intervalos definidos en base a los requerimientos de la norma API 653 (2013). Para determinar la condición e integridad del fondo, se puede realizar con el tanque en servicio utilizando diferentes métodos como los electromagnéticos. Mayormente se basan en la velocidad de corrosión. La norma define el intervalo inicial y los subsecuentes.

Interna inicial:

El intervalo desde el inicio de la puesta en servicio hasta la primera inspección interna no debe exceder 10 años a menos que el tanque tenga una o más salvaguardas que pueden ser acumulativas y cada una le agrega años al intervalo inicial de 10 años. Una forma alternativa se establece utilizando Inspección Basada en Riesgos (RBI).

Interna subsecuente:

Debe determinarse de acuerdo a la velocidad de corrosión y espesores mínimos obtenidos o al procedimiento RBI. Para este último se sigue la normativa API 580 (2016), y si se excede el riesgo aceptable del criterio utilizado debe retirarse del servicio.

Externa:

La condición externa del tanque se debe monitorear por inspección visual cercana al suelo en una rutina básica, por el personal del propietario u operador o bien por otro inspector autorizado. El personal que realiza esta inspección debe tener conocimiento de las operaciones de las instalaciones de almacenamiento, el tanque, y las características del producto almacenado.

La inspección visual se debe llevar a cabo al menos cada cinco años, o $(RCA/4 N_c)$ años (donde RCA es la diferencia entre el espesor de la cáscara medido y el espesor mínimo requerido en milésimas de pulgada, y N_c es la velocidad de corrosión del cuerpo en milésimas de pulgada por año), el que sea menor. Los tanques pueden estar en funcionamiento durante esta inspección. En aquellos tanques con aislación se retira la misma solo en la extensión necesaria para determinar la condición de la pared exterior del tanque o techo.

La medición de espesores por ultrasonido puede ser útil para determinar la velocidad de corrosión general uniforme mientras el tanque se encuentra en servicio y proveer una indicación de la integridad del cuerpo. El intervalo máximo debe ser $(RCA/2 N_c)$ años o 15 años (el que sea menor) o 5 años cuando la velocidad de corrosión no se conoce.

2.5 NORMATIVAS DE REFERENCIA

En cuanto al diseño y verificación estructural se siguen las normas API 650 (2013) y para inspección y mantenimiento API 653 (2013). También se busca apoyo en la Res. SE 785 (2005) para monitoreo e inspección de tanques. Para determinar las cargas se recurre a los reglamentos CIRSOC 101 (2005), 102 (2005), 103 (2018) y 104 (2005). Otra norma de referencia de corrosión es la NACE 193 (2001). En el análisis de riesgo se recurre a API 581/581(2016).

CAPÍTULO 3

CASO DE ESTUDIO

3.1 LOCALIZACIÓN

El tanque en estudio se encuentra en Las Heras, Provincia de Santa Cruz, como se indica en la Figura 3.1. Es un componente de una Planta de Tratamiento de Crudo (PTC) de la zona. En las Figuras 3.2 (a) y (b) se muestra la ubicación satelital con la vista general de la batería y el detalle del tanque estudiado. El año de puesta en servicio del mismo fue 1994.

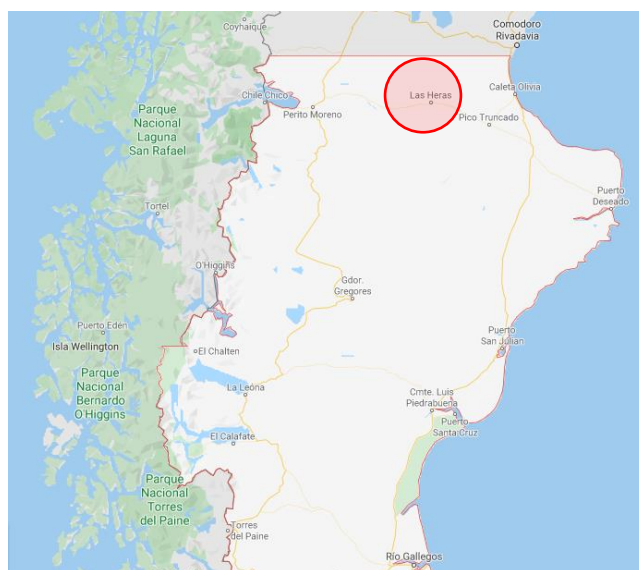


Figura 3.1: Ubicación de Las Heras, Santa Cruz.



Figura 3.2 Ubicación satelital del tanque en estudio, (a) Vista general de la batería, (b) Detalle del tanque estudiado.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL TANQUE

El fluido (petróleo + agua) ingresa al tanque cortador por debajo y choca con las placas deflectoras dentadas. Las sales son solubles en agua y no en petróleo por lo cual es necesario que el contenido de agua sea mayor para favorecer la migración de sales (se diluyan en un volumen mayor). La separación depende de los siguientes factores:

- Temperatura,
- Químicos desemulsionantes,
- Tiempo de residencia,
- Características del petróleo a tratar,
- Características del diseño del tanque.

Así, el tanque queda compuesto por 3 capas diferenciadas, agua residual con sales en la parte inferior, capa intermedia con emulsión agua/petróleo y la capa superior donde flota el hidrocarburo por ser de menor densidad.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE

3.3.1 DATOS GENERALES

- Tipo de techo: Umbrella espesor 4,76 mm,
- Diámetro: 34 m,
- Altura de envolvente: 12 m,
- Altura segura de llenado: 11,4 m,
- Tipo de base: Anillo de Hormigón,
- Tipo de fluido: Petróleo crudo y agua de producción,
- Tipo de material: Tanque ruso.

Se muestra un esquema de la envolvente con sus accesorios y conexiones en la Figura 3.3.

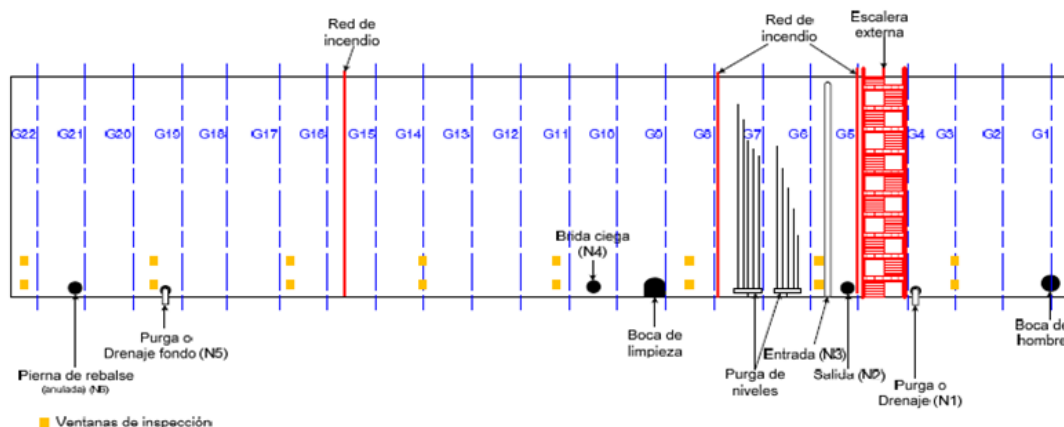


Figura 3.3: Esquema envolvente.

3.3.2 CONEXIONES Y ACCESORIOS

El tanque presenta una cañería de rebalse como la que se muestra en la Figura 3.4 y una purga de fondo para que puedan depositarse los sólidos, bandejas con grifos saca muestras a distintos niveles para controlar los espesores de las capas mencionadas y toma muestras del hidrocarburo a la salida para controlar la eficacia de la deshidratación.



Figura 3.4: Cañería de rebalse.

La estructura se conforma de anillos soldados llamados virolas, que son secciones de la pared de distinto espesor en función de la altura (la más solicitada es la inferior). La altura de éstas está comprendida entre 1 y 2 m. Presenta aislamiento térmico para mantener la temperatura interior elevada y luego una chapa de cerramiento abulonada. Se disponen ánodos de sacrificio en el piso y paredes de la parte inferior para protección ante corrosión galvánica y recubrimiento mediante pintura epoxi para protección ante corrosión bacteriana.

3.4 ANTECEDENTES

El tanque en estudio fue puesto fuera de servicio el 8 de marzo de 2019. Dicha decisión fue tomada a partir de los resultados observados en una serie de ensayos no destructivos que se realizaron durante los años 2018 y 2019, siendo esta la primera vez que se realiza una inspección interna del tanque desde 1994. Dichos ensayos muestran el avance de la corrosión localizada con abruptas reducciones en el espesor de la primera virola y en el techo del tanque que se encuentra muy deteriorado. Se notan socavaciones por debajo del terraplén y grietas en la base de hormigón. Se encontraron sólidos y líquido depositados en la parte inferior.

El proceso de limpieza consistió en la succión de los residuos a través de una ventana en la envolvente de dimensiones 2m x 3m mediante un camión con bomba, aproximadamente 1.5 m de altura de sólidos fueron retirados. Se hidrolavó el equipo completo para retirar los restos y verificar si hay carbonatos adheridos que requirieran arenado de inspección y se realizó la auditoría técnica del tanque. La Figura 3.5 muestra 3 zonas diferenciadas sobre las cuales avanzó el equipo. Este proceso demoró varios meses debiendo reprogramarse el circuito de tratamiento del crudo para no frenar la producción.

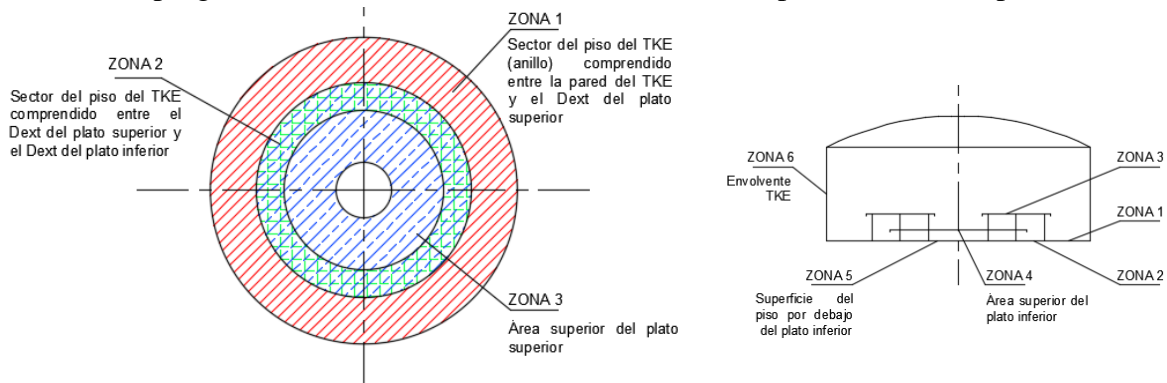


Figura 3.5: Esquema de procedimiento de limpieza.

3.5 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS:

Sobre el tanque en estudio se realizaron diferentes inspecciones desde su puesta en servicio que son detalladas a continuación:

- Inspección de condición técnica (Res. 755/05) en agosto de 2018 en la que se obtuvieron planillas de datos técnicos, informes de ensayos de emisión acústica, registro de espesores y topográfico de la envolvente y del techo.
- Relevamiento topográfico realizado en 2015.
- Ensayos de Emisión acústica en 2010.
- Evaluación de asentamientos en 2016.
- Medición de espesores en 2010, 2016, 2018 y 2019.
- Inspección visual externa en 2016 y 2018.
- Inspección interna en 2019 y vigente a la fecha.

A continuación, se describen los ensayos realizados cuyos resultados son mostrados en el ítem 3.6:

El *relevamiento topográfico* se realizó con estación total desde 3 puntos fuera del tanque formando triángulo equilátero, para vincular las estaciones. La medición del triángulo se ajustó por el método de mínimos cuadrados, para obtener precisión, obteniéndose un modelo en 3D del tanque. Son mediciones muy precisas, del mismo orden que el escáner, pero difiere con éste en que no genera una nube de puntos muy densa, ya que la medición es punto a punto, sin tener referencia in situ del punto ya medido. Por ello

las mediciones se realizaron sobre las virolas, tomando una gran cantidad de puntos sobre las mismas. El resultado que se obtuvo fue: gran densidad de puntos sobre las virolas y poca densidad de puntos entre virolas. No se obtuvo dato del piso y del techo, y de las paredes solamente puntos sobre las virolas, también existió el inconveniente del revestimiento.

Las mediciones en base a *emisión acústica* se basaron en el procedimiento “TankPAC^R: Tank Floor Test ProcedureTM”, documento que regula la ejecución del ensayo, y la aplicación de criterios de análisis fundamentados en ensayos realizados previamente. Se consideraron básicamente dos factores de análisis: ACTIVIDAD TOTAL REGISTRADA, en cuanto al daño acumulado por corrosión y la LOCALIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD REGISTRADA que representa la concentración de señales localizadas en el fondo, indicativo de las regiones de mayor probabilidad de pérdida. Estas mediciones permiten realizar una calificación de las áreas activas debido a corrosión, como intensidad A (daño de baja intensidad), B, C, D, E (daño de alta intensidad), y una clasificación de áreas activas debido a probabilidad de pérdida con cinco condiciones de probabilidad, variando de 1 (menor probabilidad) hasta 5 (mayor probabilidad). La asociación de los dos tipos de daños predominantes (corrosión y pérdida) califica la condición final del fondo del tanque, conforme a la matriz de clasificación y las respectivas recomendaciones.

Para la evaluación de *asentamientos del fondo* del tanque se realizó una inspección visual de la fundación observándose la presencia de zonas de desmoronamiento o de escurrimiento de agua. De acuerdo a las especificaciones de API 653 (2013) se tomaron medidas de elevación alrededor de la circunferencia del tanque en 10 puntos igualmente espaciados separados por 15,86 pies, la norma indica un mínimo de 8 puntos con un espacio no mayor de 32 pies. Estas mediciones se realizaron con un nivel electrónico de precisión, utilizando mira milimétrica de Invar (es el material con menor índice de dilatación), y una placa base de apoyo (sapo de nivelación) para colocar la mira sobre terreno blando, con una precisión de un milímetro. Las desviaciones de la solapa anular se representaron respecto de una horizontal trazada a lo largo de la envolvente, mediante una recta que unió dos puntos de la curva donde existía un punto de inflexión S_{arc} .

En la medición de *espesores por ultrasonido* el espesor t es el producto de la velocidad V_s del sonido en el material por la mitad del tiempo t_s de tránsito a través del material:

$$t = V_s * \frac{t_s}{2} \quad (3.1)$$

El instrumento ultrasónico de impulso-eco midió el tiempo de tránsito del pulso de ultrasonido a través de la parte. El display del instrumento, (tubo de rayos catódicos TRC o digital) debió ser ajustado para presentar convenientes valores de espesor del rango a ser

usado. Cuando se observaron disminuciones de espesor localizadas, el ingeniero de integridad junto al operador decidió aquellos lugares donde debió determinarse el espesor mediante una grilla de determinadas dimensiones ubicándola según su criterio y lo que creían relevante registrar.

Las mediciones sobre la envolvente se refieren a dos zonas identificadas como A y B. La zona A es la zona de acceso desde el suelo donde se tomaron puntos sobre 2 líneas que recorran perimetralmente toda la envolvente, una sobre la primera virola y otra sobre la segunda virola. Los puntos se designaron como A1, A2, A3...An numerándose siempre en sentido horario, como se muestra en la Figura 3.6 (a). La zona B es la zona de acceso desde la escalera, en esta zona se trazaron puntos sobre la superficie y a lo largo de una línea paralela a su desarrollo contra la envolvente. Los puntos se designaron como B1, B2, B3...Bn numerándose siempre de abajo hacia arriba. Una vez ubicada una zona con espesor reducido localizado, se trazó una grilla con puntos para la medición de espesores. Los puntos se definieron por la intersección de las líneas generatrices 1, 2, 3...hasta n, con los planos secantes A, B, C...hasta Z, como se indica en la Figura 3.6 (b).

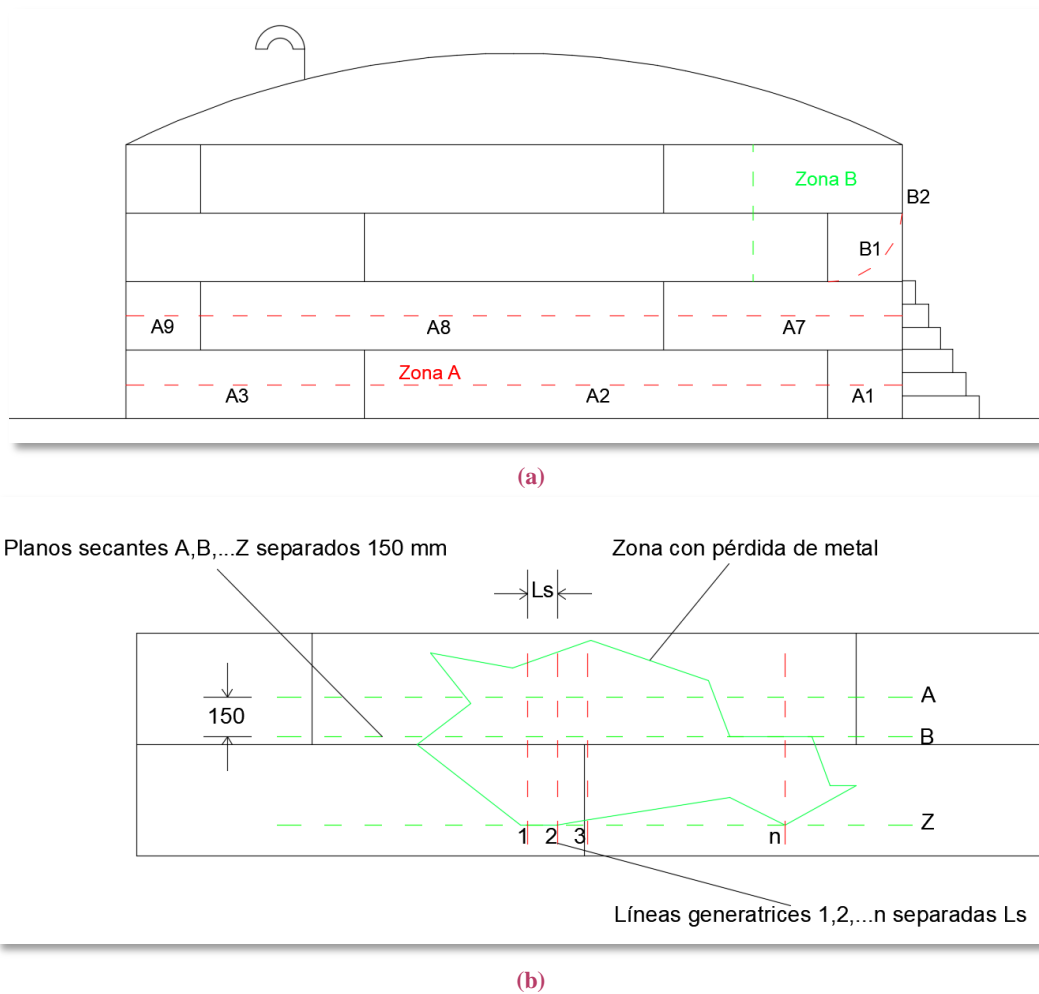


Figura 3.6: a) Esquema de grilla de medición de espesores para tanque de almacenamiento, b) Esquema de grilla en envolvente de tanques.

Una vez obtenidas las mediciones se recalcularon los espesores mínimos para las virolas y se verificó si los espesores obtenidos verifican el valor mínimo. Esto se realizó para la primer y segunda virola.

En cuanto a la *inspección visual externa* se examinaron las superficies exteriores desde el suelo y desde las escaleras o plataformas existentes para detectar corrosión, deformaciones, o ampollado. En las manchas de óxido, ampollas de pintura o manchas de petróleo, se evaluaron las posibles existencias de pérdidas. Para la aislación se comprobó la existencia de deterioros, aberturas, roturas o puntos de ingreso de agua y se verificó el estado de los sellos alrededor de las boquillas y otras aberturas de la aislación. Se inspeccionaron visualmente las fundaciones de hormigón para comprobar la existencia de fisuras, descascarado o asentamiento desparejo.

3.6 RESULTADOS DE INFORMES

3.6.1 INSPECCIÓN VISUAL EXTERNA

Las Figuras 3.7 a 3.9 muestran los daños registrados en la inspección externa realizada en 2016. Se observan derrames de producto, deterioro del revestimiento del tanque y del techo. La Figura 3.10 muestra daños y fisuras en la base de hormigón con socavación de terraplén. Las manchas de petróleo en la envolvente son indicio de la ocurrencia de derrame de producto, el revestimiento se encuentra ondulado y con abolladuras y el techo tiene picaduras por corrosión, siendo imposible acceder al mismo para realizar el mantenimiento correspondiente.

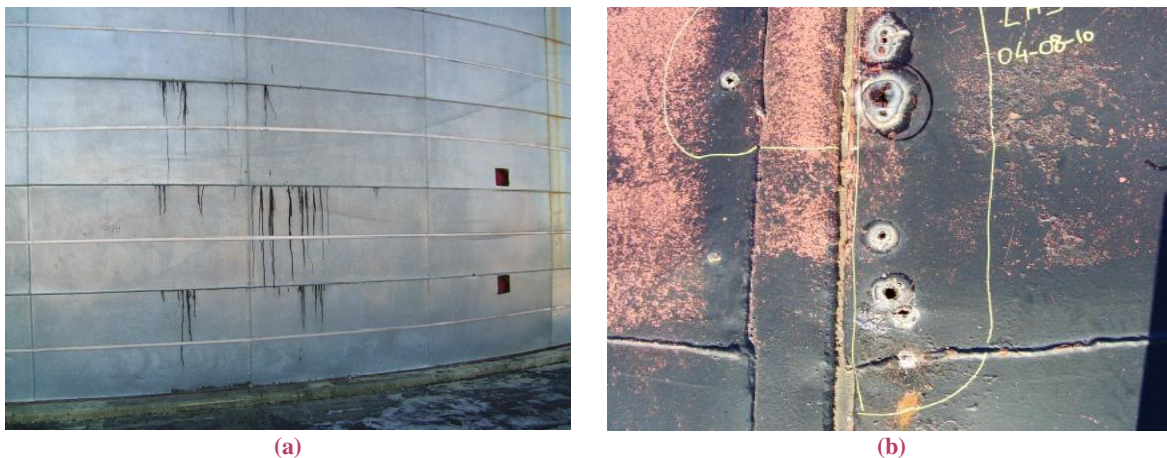


Figura 3.7: Daños registrados en inspección (2016): (a) Derrame de producto, (b) Corrosión en el techo.



Figura 3.8: Derrame de producto y deterioro en revestimiento (2016).



Figura 3.9: Corrosión en el techo (2016).



Figura 3.10: Socavación de terraplén y fisuras en la de base de hormigón (2016).

3.6.2 EVALUACIÓN DE CORRÓSION

Los resultados de las mediciones de espesores permiten tener una valoración de las reducciones de espesor en cuadrículas definidas en la primera virola con el valor máximo, mínimo y promedio medido en cada una de ellas. Se tomaron mayor cantidad de mediciones que lo que se solicita por normativa debido a que se observó un estado muy deteriorado por corrosión en la primera virola, con un avance progresivo durante el último tiempo. La Figura 3.11 presenta detalles de las cuadrículas de puntos sobre las que se realizaron las mediciones. En la zona donde se realizaron las mediciones se retiró el revestimiento para poder acceder a la envolvente. Observando las fotografías y relacionando las distancias con el esquema de la Figura 3.3 se confecciona un plano a escala de la envolvente representando cada cuadrícula en el lugar correspondiente.



Figura 3.11: Cuadrículas de medición sobre la envoltura en la primera virola.

Las mediciones fueron realizadas aproximadamente hasta una altura de 1m y 17m sobre el perímetro. En cada porción deteriorada se trazaron cuadrículas denominadas como C1 a C6 según las líneas generatrices y M1 a M6 según los planos secantes y en las intersecciones se realizó la medición para obtener valores con mayor detalle. Las figuras 3.12 y 3.13 muestran un detalle de las mediciones en dos cuadrículas ensayadas sobre la chapa 18 en la zona cercana al apoyo. En ambas figuras se puede observar una vista general del sector evaluado sobre el tanque, un detalle de la cuadrícula y de los espesores registrados en cada punto.



CHAPA 18: A6

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
M1	7,45	5,67	12,47	10,54	6,37	5,60
M2	12,56	12,72	13,15	11,43	13,11	4,27
M3	13,26	13,18	13,21	13,19	13,06	13,03
M4	12,99	13,09	7,13	7,34	4,01	6,36
M5	8,08	6,62	12,99	8,17	11,02	6,80
M6	13,02	7,97	13,06	6,61	7,36	6,81
PROMEDIO	9,83					
MAXIMO	13,26					
MINIMO	4,01					

VALOR MINIMO DETERMINADO POR BARRIDO

(C5-M4) 4,01

(c)

Figura 3.12: Ensayos sobre Chapa 18 de la Virola 1, (a) Vista general, (b) Detalle de cuadrícula A6, (c) Espesores en cuadrícula A6.



CHAPA 18: A10

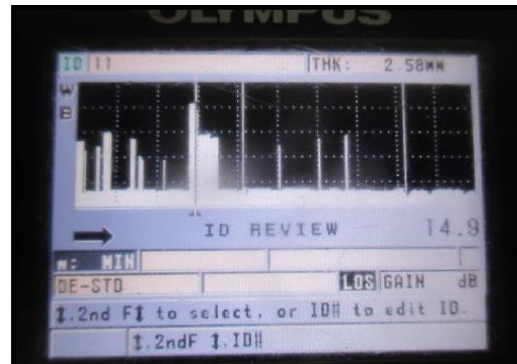
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
M1	6,56	3,35	6,44	5,98	12,96	6,74
M2	6,61	6,35	6,75	7,25	6,77	5,62
M3	6,23	6,30	13,02	7,66	13,02	5,97
M4	13,20	12,85	12,81	13,02	12,80	13,16
M5	13,00	13,06	13,17	7,71	13,01	8,39
M6	3,01	12,98	12,99	7,46	2,54	7,28
PROMEDIO	9,06					
MAXIMO	13,20					
MINIMO	2,54					

VALOR MINIMO DETERMINADO POR BARRIDO

(C5-M6) 2,54

B-SCAN

(C5-M6) 2,58



(c)

(d)

Figura 3.13: Ensayos sobre Chapa 18 de la Virola 1, (a) Vista general, (b) Detalle de cuadrícula A10, (c) Espesores en cuadrícula A10, (d) Registro B-SCAN.

En la Figura 3.13 (d) se presenta el registro en el dispositivo de medición con uno de los valores más reducidos que fueron medidos, se puede observar que en ambas mediciones los valores registrados difieren bastante entre los diferentes puntos de la cuadrícula y que el mínimo valor se encuentra en un sector muy reducido. La Tabla 3.1 muestra los resultados de todas las mediciones realizadas, si bien existe disparidad entre los resultados la gran mayoría son menores a lo necesario por cálculo. Para todas las cuadrículas se registra el valor máximo, el promedio y el mínimo, junto con su ubicación. Se observa que el valor mínimo fue detectado por B-SCAN siendo de 1,91 mm.

VIOLA	CHAPA	N° DE CUADRÍCULA	GRILLA	ESPESOR ULTRASONIDO (mm)				B-SCAN				OBSERVACIÓN			
				PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	UBICACIÓN MÍNIMO	NÚMERO	DISTANCIA (mm)	UBICACIÓN MÍNIMO	VALOR MÍNIMO (mm)				
1				A1	10x10	11,65	13,72	6,05	C8-M8	1	750		6,37		
				A2	10x10	12,76	15,86	5,8	C2-M4						
				A3	10x10	12,39	14,13	5,54	C4-M1	2	750			5,11	
				A4	10x10	12,62	14,47	5,25	C8-M7						
				C7	6x6	9,13	13,03	4,95	C2-M4	7		C2;3-M5		6,17	
				C8	6x6	8,53	13,17	5,81	C3-M4	6		C3-M4		6,35	
				C9	6x6	8,08	13,2	5,02	C5-M1	4		C4/5-M1		4,84	
										5		C1/2-M4/5		4,09	
				C10	6x6	8,29	12,98	3,13	C2-M3	3		C2/3-M3		3,03	
				C11	6x6	6,48	8,14	4,53	C6-M5	8		C5-M4		4,41	
										9		C6-M2		6,49	
				A5	6x6	8,91	13,2	5,03	C2-M3	-	-	-		-	
				A6	6x6	9,83	13,26	4,01	C5-M4	10	300	C5-M2		6	
				A7	6x6	7,24	13,19	5,64	C3-M1	-	-	-		-	
				A8	6x6	10,88	13,2	6,07	C6-M3	-	-	-		-	
				A9	6x6	7,22	13,19	5,6	C1-M2	-	-	-		-	
				A10	6x6	9,06	13,2	2,54	C5-M6	11	300	C5-M5/6		2,58	
				C5	6x6	11,53	13,26	2,63	C3-M5	12	300	C3-M4/5		1,91	Medición mínima
1				A1	6x6	13,33	13,44	13,04	C4-M1	-	-	-	-		
				A2	6x6	12,87	13,19	9,24	C2-M5	-	-	-	-	-	
				A3	6x6	13,21	13,75	12,65	C5-M6	-	-	-	-	-	
				A4	6x6	26,03	26,5	20,15	C6-M1	-	-	-	-	-	Con refuerzo
				A5	6x6	13,08	13,22	12,84	C1-M2	-	-	-	-	-	
				A6	6x6	12,88	13,18	12,05	C3-M6	-	-	-	-	-	
				A7	6x6	13,15	13,64	13,03	C4-M3	-	-	-	-	-	
				A8	6x6	12,81	13,27	4,59	C3-M6	13	300	C3-M5		4,62	
				A9	6x6	13,12	13,92	12,74	C5-M6	-	-	-	-	-	
2	1	A1	6x6	10,73	10,99	10,5	C2-M6	-	-	-	-				
1	2	A1	6x6	12,98	13,27	11,55	C5-M1	-	-	-	-				
2				A1	6x6	11,08	11,99	10,76	C2-M6	-	-	-	-		
				A2	6x6	12,87	13,44	4,71	C2-M6	14	300	C2-M6		4,7	
1				A1	6x6	12,78	13,17	12,41	C1-M3	-	-	-	-		
				A1	6x6	12,98	13,75	12,29	C6-M5	-	-	-	-	-	

Tabla 3.1: Resultado del total de las mediciones sobre la envolvente.

En el Capítulo 5 se explica la implementación en ABAQUS (2006) del modelo del tanque con espesores reducidos, considerando los espesores adoptados y una reducción progresiva de los mismos. En dicha instancia se utiliza como mínimo valor medido 1,91 mm.

3.6.3 EVALUACIÓN DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES DE LA BASE

Para evaluar el asentamiento de la base del tanque se realizó una nivelación de la misma con nivel electrónico y además un relevamiento topográfico de la envolvente. Como resultado de la nivelación se midieron 10 puntos igualmente espaciados a lo largo del perímetro del tanque y ubicados todos al mismo nivel. Posteriormente se tomó la medida de cada punto hasta la base de hormigón ya que la solapa anular se encontraba muy ondulada. Los valores medidos se muestran en la Tabla 3.2. Las mediciones varían en un rango de 40 mm a lo largo de la base, con ondulaciones en el desarrollo del perímetro del tanque.

	MEDICION mm
1	1326
2	1300
3	1300
4	1304
5	1315
6	1315
7	1335
8	1340
9	1334
10	1315
11	1325

Tabla 3.2: Resultado de las mediciones en ensayo de asentamiento

En cuanto al relevamiento topográfico, las mediciones se realizaron sobre el revestimiento exterior del tanque en aquellos puntos que se encuentran fijos a la estructura interior (perfiles metálicos) asumiendo que imitan el movimiento de las propias virolas. Se utilizaron los resultados obtenidos en la base ya que aquellos puntos están unidos y fijos a la fundación de hormigón acompañando los asentamientos de la misma. Se obtuvieron las coordenadas de 48 puntos a lo largo del perímetro de la base, representando más adecuadamente la variación en altura de la misma que el método adoptado por API 653 (2013). En la Figura 3.14 se muestra una imagen del plano 3D con las mediciones de topografía representadas en AutoCAD y en la Figura 3.15 una vista en planta del tanque con la nube de puntos.

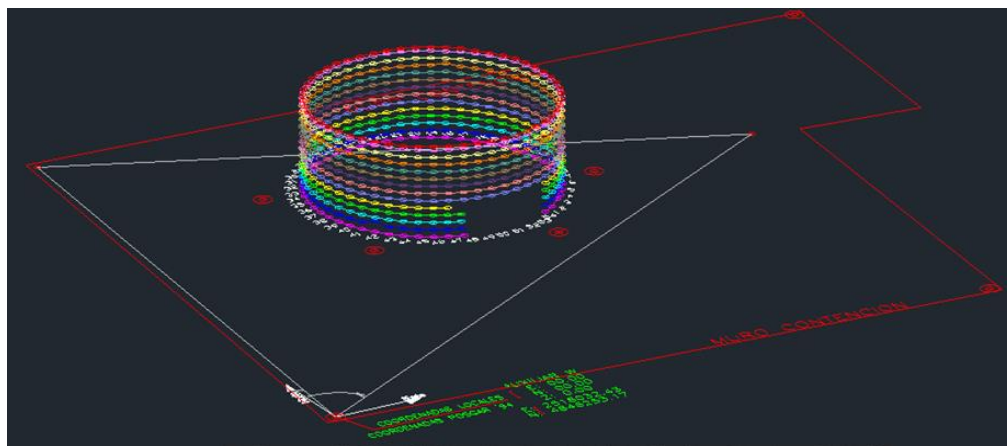


Figura 3.14: Plano 3D con las mediciones de topografía (AutoCAD).

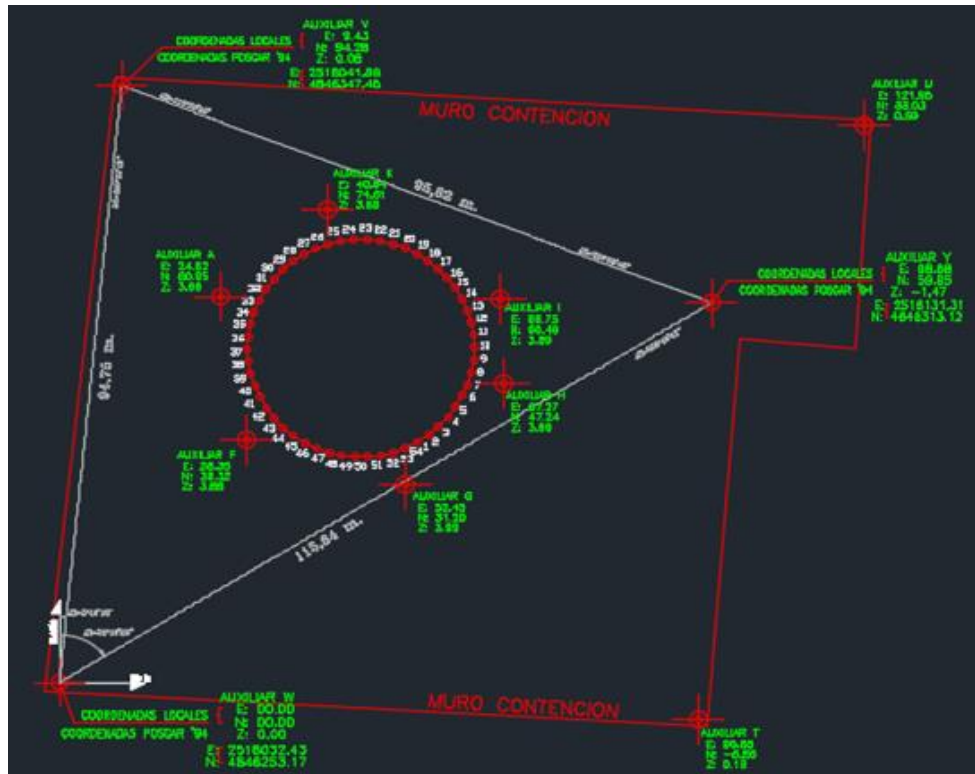


Figura 3.15: Vista en planta del tanque con la nube de mediciones de topografía.

En el presente trabajo se utiliza el plano 3D aislando la nube de puntos del resto de los elementos y el comando “Propiedades” del software para obtener las cotas de cada medición respecto al origen de coordenadas. En la Figura 3.16 se muestra la nube de puntos 3D aislada en AutoCAD.

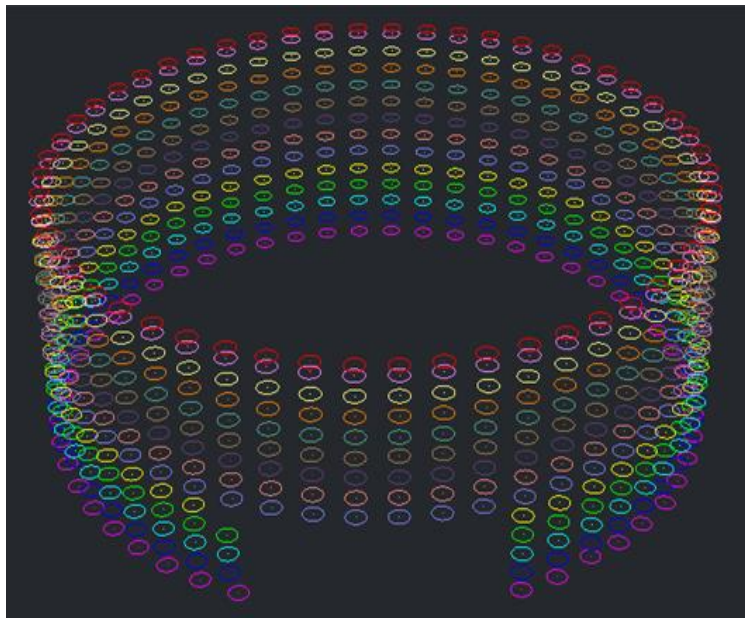


Figura 3.16: Nube de puntos 3D en AutoCAD.

Se representan las cotas “z” de cada punto de la nube en una tabla y se calcula la diferencia existente entre cada cota y la siguiente para obtener un “delta z” y poder representar el asentamiento de la envolvente. Se observa que algunas mediciones corresponden a asentamientos exagerados en una corta distancia por lo cual se consideran errores groseros. Para suavizar dichos errores, se decide reemplazarlos por el promedio entre su valor anterior y siguiente. En la Tabla 3.3 se muestran los resultados de las mediciones originales y modificadas (suavizando los valores resaltados en rojo). La mayor parte de las mediciones quedan acotadas dentro de un límite superior de 4,14 m y de un límite inferior de 4,08 m, representando ondulaciones de 6 cm.

Mediciones originales				Mediciones modificadas				
Punto	z (m)	delta z (m)	delta z (cm)	Punto	z(m)	Max (m)	Min (m)	Delta z (cm)
1	4,11	0	0	1	4,11	4,14	4,08	0
2	4,1	-0,01	-1	2	4,1	4,14	4,08	1
3	4,34	0,24	24	3	4,1	4,14	4,08	0
4	4,1	-0,24	-24	4	4,1	4,14	4,08	0
5	4,1	0	0	5	4,1	4,14	4,08	0
6	4,16	0,06	6	6	4,105	4,14	4,08	0,5
7	4,11	-0,05	-5	7	4,11	4,14	4,08	0,5
8	4,12	0,01	1	8	4,11	4,14	4,08	0
9	4,11	-0,01	-1	9	4,11	4,14	4,08	0
10	4,1	-0,01	-1	10	4,1	4,14	4,08	1
11	4,09	-0,01	-1	11	4,095	4,14	4,08	0,5
12	4,09	0	0	12	4,09	4,14	4,08	0,5
13	4,08	-0,01	-1	13	4,09	4,14	4,08	0
14	4,11	0,03	3	14	4,09	4,14	4,08	0
15	4,09	-0,02	-2	15	4,09	4,14	4,08	0
16	4,11	0,02	2	16	4,1	4,14	4,08	1
17	4,11	0	0	17	4,11	4,14	4,08	1
18	4,15	0,04	4	18	4,115	4,14	4,08	0,5
19	4,12	-0,03	-3	19	4,1275	4,14	4,08	1,25
20	4,15	0,03	3	20	4,13375	4,14	4,08	0,625
21	4,14	-0,01	-1	21	4,14	4,14	4,08	0,625
22	4,08	-0,06	-6	22	4,08	4,14	4,08	6
23	4,02	-0,06	-6	23	4,02	4,14	4,08	6
24	4,02	0	0	24	4,02	4,14	4,08	0
25	4,01	-0,01	-1	25	4,02	4,14	4,08	0
26	4,02	0,01	1	26	4,02	4,14	4,08	0
27	4,03	0,01	1	27	4,02	4,14	4,08	0
28	4,02	-0,01	-1	28	4,02	4,14	4,08	0
29	4,13	0,11	11	29	4,13	4,14	4,08	11
30	4,12	-0,01	-1	30	4,125	4,14	4,08	0,5
31	4,12	0	0	31	4,12	4,14	4,08	0,5
32	4,12	0	0	32	4,12	4,14	4,08	0
33	4,12	0	0	33	4,12	4,14	4,08	0
34	4,12	0	0	34	4,12	4,14	4,08	0
35	4,11	-0,01	-1	35	4,115	4,14	4,08	0,5
36	4,11	0	0	36	4,11	4,14	4,08	0,5
37	4,12	0,01	1	37	4,105	4,14	4,08	0,5
38	4,1	-0,02	-2	38	4,1	4,14	4,08	0,5
39	4,1	0	0	39	4,095	4,14	4,08	0,5
40	4,09	-0,01	-1	40	4,09	4,14	4,08	0,5
41	4,09	0	0	41	4,09	4,14	4,08	0
42	4,1	0,01	1	42	4,09	4,14	4,08	0
43	4,08	-0,02	-2	43	4,09	4,14	4,08	0
44	4,09	0,01	1	44	4,095	4,14	4,08	0,5
45	4,1	0,01	1	45	4,1	4,14	4,08	0,5
46	4,1	0	0	46	4,1	4,14	4,08	0
47	4,1	0	0	47	4,1	4,14	4,08	0
48	4,08	-0,02	-2	48	4,09	4,14	4,08	1

Tabla 3.3: Resultados de mediciones topográficas de asentamientos.

A su vez, en una zona de la envolvente se registran diferencias de cota que exceden los límites mencionados. Dicha zona comienza con una diferencia de cota de 6 cm en el punto 22 con respecto al 21 y finaliza con una diferencia de cota de 11 cm en el punto 29 con respecto al 28. Se grafica la curva de asentamientos representando las diferencias de cota sumado a los límites superior e inferior y la zona que excede los mismos como se observa en la Figura 3.17. Se llama cota síntesis a aquella que no contempla los errores groseros mencionados anteriormente sino dichos valores suavizados.

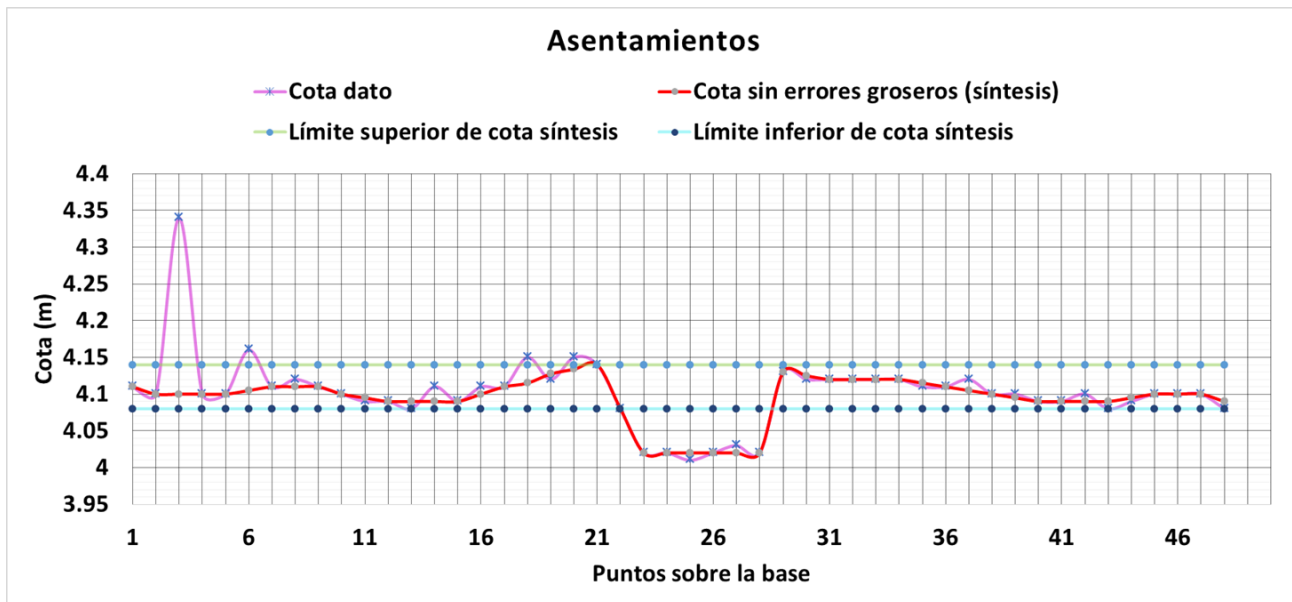


Figura 3.17: Gráfico con curvas de asentamientos.

Como se observa en la curva de cota síntesis en la Figura 3.17 una porción de la envolvente tiene un gran asentamiento. La misma se compone de tres partes. Dos presentan una variación lineal (del punto 21 al 23 y 28 al 29) y una parte recta donde el asentamiento se mantiene sin variación de cota. La longitud total de la porción asentada sobre la envolvente es de 16 m y la diferencia total entre cota mayor y menor es de 12 cm.

La zona mencionada con el asentamiento diferencial de apoyo se implementa en el modelo del tanque en ABAQUS (2006). Para el análisis se crea como modelo el tanque deformado considerando los asentamientos en la base de hormigón sumado a la reducción de espesores mencionada anteriormente.

CAPÍTULO 4

DISEÑO ESTRUCTURAL

4.1 MATERIALES

El tanque es ruso por lo cual se realiza una investigación sobre los tipos de aceros utilizados por dicha normativa. De la norma rusa se sabe que si el tanque es de 10000 m³ de capacidad la tensión de fluencia del material utilizado es 254 MPa y la de rotura de 372 a 480 MPa, con un porcentaje de alargamiento del 26%. Por otro lado, el acero más utilizado en las estructuras de la industria hidrocarburífera es el acero ASTM A36. El mismo tiene una tensión de fluencia de 250 MPa y de 400 MPa de rotura⁴, coincidiendo con los límites propuestos en la norma rusa. En el presente trabajo se adopta dicho material para los cálculos y análisis.

Como no se tienen los datos de diseño exactos de la estructura, sino solo referencias, se decide adaptar el tanque a la normativa API. Para ello se efectúan los cálculos correspondientes para obtener la geometría exacta del modelado.

4.2 ANÁLISIS DE CARGAS

- Cargas y sobrecargas – CIRSOC 101 (2005)

-Permanentes

Agua: 10kN/m³

Petróleo crudo: 9kN/m³

Acero A36M: 78,5 kN/m³

-Sobrecargas

No se incluyen en los análisis del presente trabajo.

- Carga de viento – CIRSOC 102 (2005)

Del capítulo 5 se obtiene:

- Velocidad básica del viento $V=62$ m/s, valores referidos a velocidad de ráfaga de 3 segundos en m/s a 10 m sobre el terreno para Categoría de Exposición C asociadas a probabilidad anual de 0,02 (Figura 1 A o Tabla de la Figura 1 B).
- Factor de direccionalidad del viento $K_d=0,95$ para estructuras redondas (Tabla 6).

⁴ Fuente: API Standard 650 (2013). Welded Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute, twelfth edition. Table 5.2a.

- Factor de exposición K_z o $K_{zh}=1,05$, para exposición C y asumiendo $z=12,5$ ya que la altura es de 12 m y lo adoptado se encuentra del lado de la seguridad (Tabla 5).
- Factor de importancia $I=1,15$, para categoría de edificio III (aquellas que contienen suficientes cantidades de sustancias tóxicas o explosivas como para ser peligrosas al público si se liberan incluyendo instalaciones petroquímicas) según lo indica la Tabla A-1 del Apéndice A.
- Categoría de exposición C para terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menores que 10 m.
- Efectos topográficos (artículo 5.7.2): en la Figura 4.1 se muestra el recinto de contención y talud del tanque utilizados para los cálculos del coeficiente topográfico.



Figura 4.1: a) Talud del tanque, b) Esquema del recinto de contención del tanque.

La altura del talud es de $H=2$ metros. De estabilidad de taludes se supone una pendiente de 2:1 por lo cual $L_h=2$ metros. Así,

$$\frac{H}{L_h} = 1 \quad (4.1)$$

Dado $H/L_h > 0,5$ se supone de 0,5 y así $K_1=0,53$ (colina tridimensional axilsimétrica). Para evaluar K_2 y K_3 se substituye L_h por $2H$ y se adopta $x=6m$ (distancia desde la cresta hasta la ubicación del tanque):

$$\frac{x}{2H} = 1,5 \quad (4.2)$$

resultando $K_2=0$. Para la altura del tanque sobre el nivel local $z=12$ m,

$$\frac{z}{2H} = 3 \quad (4.3)$$

se obtiene $K_3=0$.

Entonces,

$$K_{zt} = (1 + K1 * K2 * K3)^2 = 1 \quad (4.4)$$

- Factor de efecto de ráfaga: se adopta $G=0,85$ (Anexo IV).
- Presión dinámica: se obtiene con la expresión establecida en el artículo 5.10,

$$q_z = 0,613 * K_z * K_{zt} * K_d * V^2 * I = 2,7 \text{ kN/m}^2 \quad (4.5)$$

- Presiones externas y coeficientes para depósitos, silos y tanques circulares (Anexo IV):

$$p = G * C_p * q_z \quad (4.6)$$

En paredes: Se utiliza la distribución del coeficiente C_p de la figura IV.2 de dicho reglamento.

En cubierta: Se utilizan los coeficientes dados en la figura IV.3 para una cubierta con un ángulo de $24^\circ > 10^\circ$. En la Tabla 4.1 se muestran las presiones de viento obtenidas.

ϑ	24.00	°	
Factor amplificación	1.5	-	
Espesor zona amplificación	3.4	m	
Zona	C_p	p [kN/m ²]	p amplificado [kN/m ²]
A	-0.8	-1.8	-2.8
B	-0.5	-1.1	-1.7

Tabla 4.1: Cálculo presiones de viento cubierta.

- Carga sísmica – CIRSOC 103 (2018) y API 650 (2013)

En la Figura 2.1 del reglamento se observa que Las Heras es zona sísmica 0 de peligrosidad muy reducida. La aceleración máxima del suelo en ese caso es 0,04g. En API 650 (2013) se expresa que si la aceleración es menor a 0,05g no es necesario diseñar la estructura para las fuerzas sísmicas (Anexo E.1 de dicho reglamento). No se consideran en el presente trabajo.

- Carga de nieve – CIRSOC 104 (2005) y API 650 (2013)

Las Heras por la Tabla 1.14 del reglamento se encuentra en la zona 2 de la Provincia de Santa Cruz. Para Zona 2, en Puerto Deseado, corresponde una presión sobre el terreno $p_g=0,3\text{kN/m}^2$.

La carga de nieve sobre cubierta plana p_f resulta:

$$p_f = 0,7 * C_e * C_t * I * p_g \quad (4.7)$$

- Factor de exposición $C_e=0,9$ (Tabla 2) para exposición C, totalmente expuesta (Apéndice A).

- Factor térmico $C_t=1$ (Tabla 3).
- Factor de importancia $I=1,1$ (Tabla 4), categoría III del mismo modo que en el análisis realizado para viento.

Así,

$$p_f = 0,7 * C_e * C_z * I * p_g = 0,21 \frac{kN}{m^2} \quad (4.8)$$

Se obtiene del capítulo 4 la carga de nieve para cubiertas con pendiente es:

$$p_s = C_s * p_f \quad (4.9)$$

donde C_s es el factor de pendiente resultando $C_s=1$ para cubiertas de bóveda cilíndrica.

$$p_s = 0,21 \frac{kN}{m^2} \quad (4.10)$$

La carga de nieve desbalanceada se calcula para porción de 90° a sotavento y luego reduciéndose hasta 0 en los ángulos de $22,5^\circ$ contiguos, no existiendo carga en los restantes 225° a barlovento.

Según API 650 (2013), la carga de nieve balanceada es:

$$S_b = 0,84 * \rho_g = 0,252 \frac{kN}{m^2} \quad (4.11)$$

Y la carga de nieve desbalanceada:

$$S_u = 1,5 * S_b = 0,378 \frac{kN}{m^2} \quad (4.12)$$

Se toman como valores para el modelado los correspondientes a API 650 (2013) por ser más desfavorables.

4.3 CÁLCULO DE LA ENVOLVENTE

- En la Tabla 4.2 se detallan los datos del material del tanque:

Nombre	Acero A36M	-
E	210000	MPa
St	171	MPa
Sd	160	MPa
Y	250	MPa
T	400	MPa

Tabla 4.2: Datos del material del tanque.

- En la Tabla 4.3 se muestran los datos de diseño del tanque:

Diámetro	D	34	m
Altura nivel de liquido de diseño desde base	Hv	11.4	m
Densidad relativa	Gr	1	-
Corrosion permisible	CA	2	mm
Altura virola	A virola	2	m
Numero de virolas	N°	6	-

Tabla 4.3: Datos de diseño del tanque.

- Método 1 Pie:

Para el cálculo de los espesores de la envolvente del tanque analizado, se aplica “1-Foot Method”⁵(API 650, 2013). Se consideran secciones transversales del tanque situadas a 0,3 m por encima de la parte inferior de cada trayectoria de cáscara con la condición de que el diámetro del tanque no supere 61 m. Se debe elegir el mayor valor entre t_t y t_d .

- Espesor por prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{4,9 * D * (Hv - 0,3)}{St} \quad (4.13)$$

- Espesor por condiciones de diseño:

$$t_d = \frac{4,9 * D * (Hv - 0,3) * Gr}{Sd} + CA \quad (4.14)$$

Se muestran en la Tabla 4.4 los cálculos del espesor de la envolvente y el significado de cada término de las ecuaciones 4.13 y 4.14.

⁵ Fuente: API Standard 650 (2013). Welded Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute, twelfth edition. Article 5.6.3.

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
t_t y t_d	mm	Espesor de cáscara	El mayor entre: t_t y t_d	$t_1=13,6$ mm $t_2=11,5$ mm $t_3=9,4$ mm $t_4=7,3$ mm $t_5=6$ mm $t_6=6$ mm
D	m	Diámetro nominal del tanque	Dato de partida	D=34 m
H_V	m	Altura de diseño del nivel del líquido	$H_V = H_i - 2m$	$H_1=11,4$ m $H_2=9,4$ m $H_3=7,4$ m $H_4=5,4$ m $H_5=3,4$ m $H_6=1,4$ m
Gr	-	Densidad relativa del líquido almacenado o del agua para cálculo por prueba hidrostática	$Gr = \frac{\text{Densidad del líquido}}{\text{Densidad del agua a } 4^\circ\text{C}}$	G=1
CA	mm	Corrosión permisible	Dato de partida	CA=2 mm
Sd	MPa	Esfuerzo permisible por condiciones de diseño	Tabla 5.2a API 650 (2013), acero A36M	Sd=160 MPa
St	MPa	Esfuerzo permisible por condiciones de prueba hidrostática	Tabla 5.2a API 650 (2013), acero A36M	St=171 MPa

Tabla 4.4: Cálculos del espesor de la envolvente.

Como el líquido almacenado es una mezcla emulsiva de agua, sales, petróleo y químicos, se toma como densidad del líquido el mayor de los siguientes valores: 1 o 0,84, es decir 1, que es la del agua. Dicho valor coincide con el que afecta al tanque en el momento en el cual se le realiza la prueba hidrostática de carga y se llena con agua.

Observaciones:

- El diámetro nominal del tanque D se mide en la fibra media del cuerpo
- La altura Hv se mide desde la parte baja del anillo considerando el perfil de coronamiento, o cualquier nivel indicado por el usuario, restringido por techos flotantes o cálculos por sismo.

Por Anexo M.3 en API 650 (2013), como la temperatura de diseño no supera los 93°C, no necesitan cambiarse las tensiones de diseño de la Tabla 5.2a.

La norma establece el espesor mínimo necesario en función del diámetro nominal del tanque a través de la siguiente tabla. Para un diámetro de 34 m (15 a <36) el espesor mínimo es de 6mm. Se muestra en la Tabla 4.5 los resultados de espesores de las violas que se obtienen por “1-Foot-Method”:

Viola	Hv (m)	tt (mm)	td (mm)	tmin API 650 (mm)	t (mm)
1	11,4	10,8	13,6	6	13,6
2	9,4	8,9	11,5	6	11,5
3	7,4	6,9	9,4	6	9,4
4	5,4	5,0	7,3	6	7,3
5	3,4	3,0	5,2	6	6,0
6	1,4	1,1	3,1	6	6,0

Tabla 4.5: Resultados de espesores de violas

4.4 CÁLCULO DEL TECHO

El techo con el que fue diseñado el tanque es de tipo “umbrella”. Con el apartado 5.10.6 de API 650 (2013) se determina el radio mínimo y máximo:

-Radio mínimo: $0,8 * D = 27,2$ m

-Radio máximo: $1,2 * D = 40,8$ m

Se adopta como radio para el diseño 38 m. El valor otorga una flecha de 4 m de altura para el techo.

Para el espesor mínimo debe considerarse el mayor de los 3 valores siguientes:

$$1) \frac{r_r}{2,4} * \sqrt{\frac{Tb}{2,2}} + CA \quad (4.15)$$

$$2) \frac{r_r}{2,7} * \sqrt{\frac{Uu}{2,2}} + CA \quad (4.16)$$

$$3) 5 \text{ mm} \quad (4.17)$$

El espesor máximo es de 13 mm excluyendo la tolerancia de corrosión, se adopta CA=2 mm como en el caso de la envolvente.

Se muestra en la Tabla 4.6 el cálculo del espesor de techo del tanque y el significado de cada término utilizado en las ecuaciones 4.15 a 4.17:

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
t_{techo}	mm	Espesor de techo	Según apartado 5.10.6.1 API 650 (2013)	$t_{techo} = 13$ mm
r_r	m	Radio del techo	Según apartado 5.10.6.1 API 650 (2013)	$r_r = 38$ m
Tb	kN/m ²	La mayor de las combinaciones de carga gravitatorias con carga de nieve equilibrada Sb	Tb=máx. (p3; p6)	Tb=1,35 kN/m ²
Uu	kN/m ²	La mayor de las combinaciones de carga gravitatorias sin carga de nieve equilibrada Su	Uu=máx. (p2; p5)	Uu=1,48 kN/m ²

Tabla 4.6: Cálculo espesor de techo del tanque

Las combinaciones de carga en API 650 (2013) son las siguientes combinaciones de carga gravitatoria:

$$p1 = D_L + L_r + 0,4 Pe \quad (4.18)$$

$$p2 = D_L + S_u + 0,4 Pe \quad (4.19)$$

$$p3 = D_L + S_b + 0,4 Pe \quad (4.20)$$

$$p4 = D_L + P_e + 0,4 L_r \quad (4.21)$$

$$p5 = D_L + P_e + 0,4 S_u \quad (4.22)$$

$$p6 = D_L + P_e + 0,4 S_b \quad (4.23)$$

En la Tabla 4.7 se muestra el cálculo de las combinaciones de carga para el espesor del techo umbrella y el significado de cada término de las ecuaciones anteriores:

SÍMBOLO	UNIDAD	DEFINICIÓN	FÓRMULA	RESULTADO
p_i	kN/m^2	Combinaciones de carga para el cálculo del techo umbrella	Apartado 5.2.2 API 650 (2013), inciso e)	$p1=2,1$ kN/m^2 $p2=1,48$ kN/m^2 $p3=1,35$ kN/m^2 $p4=1,65$ kN/m^2 $p5=1,4$ kN/m^2 $p6=1,35$ kN/m^2
D_L	kN/m^2	Carga muerta del techo	D_L $= \rho * t_{techo}$ $* g$	$D_L=1 \text{ kN/m}^2$
L_r	kN/m^2	Mínima carga viva para techo	Código ASCE 7	$L_r=1 \text{ kN/m}^2$
P_e	kN/m^2	Presión externa específica	API 650 (2013)	$P_e=0,25$ kN/m^2
S_u	kN/m^2	Carga de nieve sin equilibrar	Apartado 5.2.1 API 650 (2013), inciso h)2)	$S_u=0,378$ kN/m^2
g	m/s^2	Constante de gravedad	Dato	$g=9,81 \text{ m/s}^2$
ρ_{acero}	kg/m^3	Densidad del acero	Dato	$\rho_{acero}=7850$ kg/m^3
S_b	kN/m^2	Carga de nieve balanceada	Apartado 5.2.1 API	$S_b=0,252$

			650 (2013), inciso h)1)	kN/m^2
p_g	kN/m^2	Carga de nieve a nivel del terreno	CIRSOC 104 (2005)	$p_g=0,3$ kN/m^2

Tabla 4.7: Cálculo de las combinaciones de carga para el espesor del techo umbrella.

Se obtienen los valores p_i de combinaciones de cargas, como se muestra en la Tabla 4.8:

p1	2.10	kN/m^2
p2	1.48	kN/m^2
p3	1.35	kN/m^2
p4	1.65	kN/m^2
p5	1.40	kN/m^2
p6	1.35	kN/m^2

Tabla 4.8: Combinaciones de carga.

Luego las mayores cargas gravitatorias con/sin carga de nieve equilibrada T_b y U_u respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.9:

T_b	1.35	kN/m^2
U_u	1.48	kN/m^2

Tabla 4.9: Mayores cargas gravitatorias con/sin carga de nieve equilibrada.

Se calculan los 3 valores mínimos para el espesor del techo como se muestra en la Tabla 4.10 y se elige el mayor de ellos como el mínimo, respetando a su vez los máximos y mínimos reglamentarios:

1)	14,42	mm
2)	13,54	mm
3)	5,00	mm

Tabla 4.10: Mínimos espesores techo

El valor máximo dado por API 650 (2013) es 13 mm más 2 mm por corrosión admisible, obteniendo 15 mm. El espesor mínimo obtenido de la tabla anterior es 14,42 mm. Es por ello que se adopta como valor 15 mm, el cual respeta los límites reglamentarios.

4.5 FUNDACIÓN

El tanque está ubicado dentro de un recinto de contención con un mejoramiento del suelo de fundación. El mismo consiste en la creación de un talud de 2 m de altura compuesto por material granular compactado. Adicionalmente, se coloca una capa de arena compactada que sirve de soporte a las placas del piso del tanque. Se cubre el terraplén con film de polietileno como aislante hidrófugo. La cimentación es un anillo de hormigón

armado colocado sobre el relleno de material granular y aislante. El piso del tanque, colocado sobre la base de arena compactada, está conformado por placas de acero soldadas entre sí de forma traslapada. Hay una platea perimetral de hormigón complementaria con todas las conexiones y accesorios. En la Figura 4.2 se muestra la construcción de un tanque API 650 (2013) donde se puede observar el procedimiento mencionado.



Figura 4.2: Conformación del terraplén, platea perimetral y anillo de hormigón de un tanque API 650 (2013).

En algún momento de la vida del tanque se montó un piso nuevo sobre el piso anterior sin remover el mismo. Entre los dos pisos existen 3” de diferencia aproximadamente, quedando las mediciones realizadas en una altura superior a la mencionada. En la Figura 4.3 se observa la fundación del tanque en estudio.



Figura 4.3: Fundación del tanque en estudio.

CAPÍTULO 5

MODELO Y RESULTADOS COMPUTACIONALES

5.1 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE ABAQUS

ABAQUS es un programa de simulación en ingeniería desarrollado por Dassault Systems, basado en el Método de Elementos Finitos. Puede resolver desde simples problemas lineales hasta complejas simulaciones no lineales. Contiene una variada y completa librería de elementos que pueden modelar prácticamente cualquier geometría. También posee una extensa lista de modelos de materiales. Está diseñado como una herramienta de simulación generalizada.

El software trabaja con distintos módulos. A través de los mismos se ejecutan las distintas funciones que se necesitan para la generación de un modelo y el análisis según el Método de Elementos Finitos. Dichos módulos se encuentran ordenados de manera secuencial, facilitando de esta manera un orden a seguir al momento de desarrollar un modelo.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Como se explica en el Capítulo 4 el tanque en este trabajo tiene 34 m de diámetro. Tiene una envolvente de 12 m de altura, con una altura de diseño de nivel de líquido de 11,4 m y un techo tipo umbrella de 4 m de altura, autosoportado. A continuación, se detalla la secuencia de pasos del modelado:

- Módulo “Part”: se genera la geometría (virolas y techo) como estructura 3D, Shell de revolución. Además, se generan los elementos necesarios para realizar particiones y poder asignar luego las propiedades a cada una. Se utilizan puntos, ejes y planos, como se muestra en la Figura 5.1:

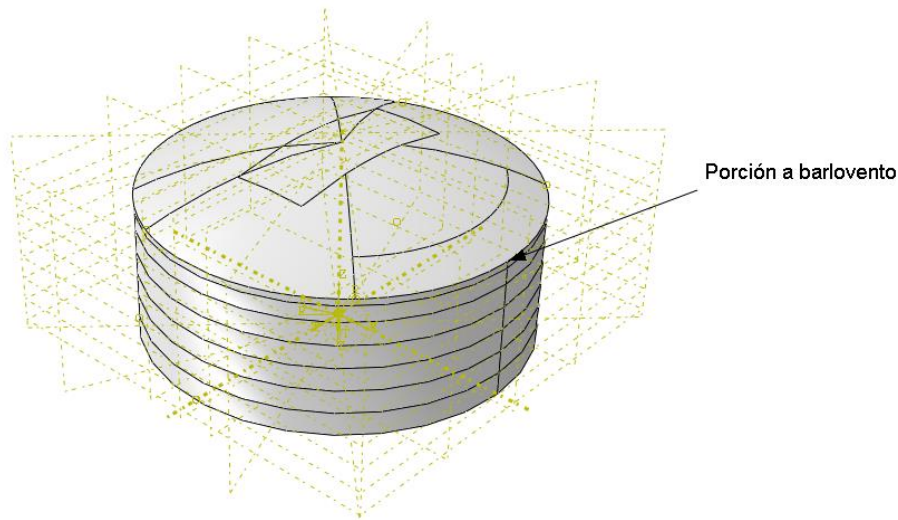


Figura 5.1: Tanque en módulo part ABAQUS (2006).

- Módulo “Property”: se crean las secciones y materiales a asignar a cada parte. En cuanto al material se definen las propiedades densidad en “General” y módulo de elasticidad en “Mechanical”. Las secciones se definen como “Shell” y “Homogeneous”. Se adoptan 5 puntos de integración intermedia siguiendo “Simpson”.
- Módulo “Assembly”: se crean y ensamblan las “Instances”, subdominios componentes del programa. Se define un mallado de tipo “Independent” por si es necesario refinar el mallado en alguna zona en particular.
- Módulo “Step”: se generan los distintos estados de carga y variables asociadas a los mismos a ser incluidas en los resultados. Se definen 3 steps: Inicial con las condiciones de contorno, apoyo fijo con restricción del desplazamiento en la base en contacto con el suelo (anillo de hormigón), General de Análisis estático (carga de nieve y fluido) y luego Linear perturbation de Buckle o no lineal de Riks (viento y asentamientos diferenciales).
- Módulo “Interaction”: no se considera necesario generar interacciones “Contact” en la estructura.
- Módulo “Load”: se crean las condiciones de borde “Boundary Condition” y cargas “Load” asociadas a cada step. Estas últimas son pressure para la presión que realiza el fluido en la base y virolas y luego la presión de viento. Además, se crean las cargas de nieve desbalanceada y balanceada. Se muestra la definición de cargas en la Figura 5.2:

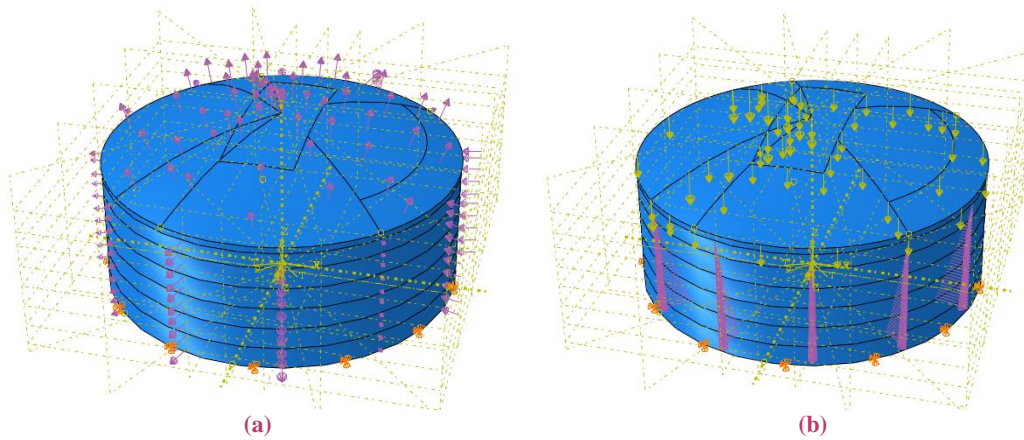


Figura 5.2: Tanque en módulo load ABAQUS (2006), a) Definición carga de viento, b) Definición cargas de fluido y nieve.

- Módulo “Mesh”: se genera la malla de elementos finitos. Para ello se realiza un análisis de convergencia para definir el tamaño de elemento adecuado en la envolvente. Se opta por elementos de tamaño 0,5 obteniendo un error relativo de 0,3% con respecto a elementos de tamaño 0,25 (tamaño para el cual el modelo difícilmente converge). Para el techo los elementos permanecen por defecto (1,3). Se define el tipo de elemento Standard-Quadratic-Quad. Como técnica de mallado, quad-dominated free, advancing front. Los elementos del modelo son cuadriláteros de 8 nodos con integración reducida (S8R5). Tienen 3 componentes de desplazamiento y 2 giros en el plano de la cáscara, es decir, 5 grados de libertad. El total de elementos es 6780. Se muestra la malla en la Figura 5.3.

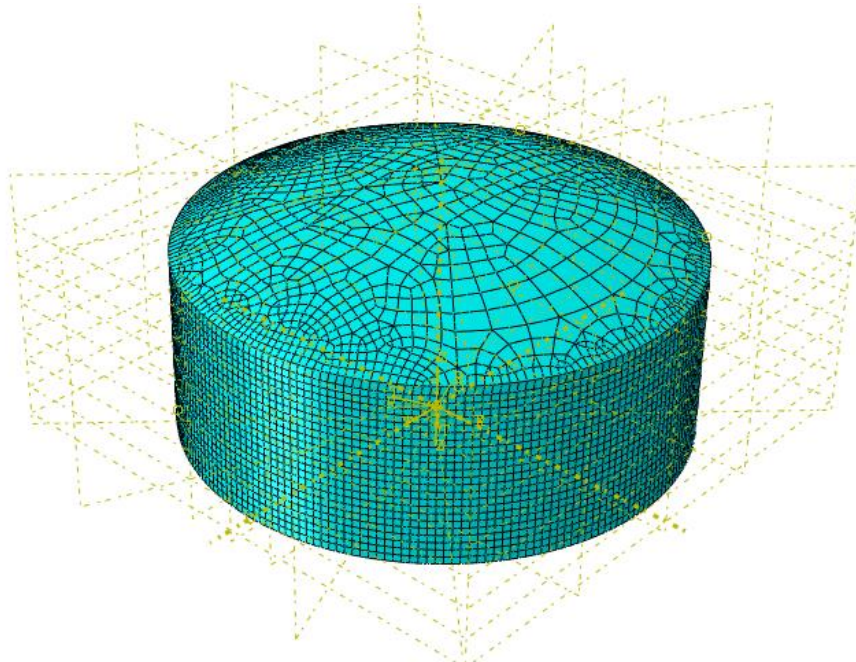


Figura 5.3: Tanque en módulo mesh ABAQUS (2006).

Al utilizar la teoría general de Reissner-Mindlin y por ser el material elástico, lineal e isótropo se pueden contemplar las relaciones constitutivas para el caso de las ecuaciones (6.1), (6.2) y (6.3):

$$\begin{bmatrix} \sigma_F \\ \sigma_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_F & 0 \\ 0 & D_C \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_F \\ \varepsilon_C \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\sigma_F = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} * \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$= D_F * \varepsilon_F$$

$$[\sigma_C] = \begin{bmatrix} \alpha_1 * G & 0 \\ 0 & \alpha_1 * G \end{bmatrix} * \varepsilon_C = D_C * \varepsilon_C \quad (5.3)$$

Donde σ son las tensiones normales, τ las tensiones tangenciales, ε las deformaciones normales, γ las deformaciones tangenciales, D la matriz de materiales, E el módulo de Young, μ el módulo de Poisson y G el módulo de corte. α_1 es un coeficiente de dilatación de distorsión lateral para hacer coincidir el problema de trabajos virtuales de la cáscara con el exacto.

Como esta teoría posee el problema de bloqueo de la solución en los elementos cuadrangulares (cuando el espesor de la placa tiende a 0 se sobreestima la rigidez a cortante), se implementa “Integración reducida”; la cual consiste en subintegrar la matriz de rigidez correspondiente al corte.

- Módulo “Optimization”: se crea y configura una tarea para que analice remoción de materiales, etc. Su utilización es opcional y no es requerida para el presente trabajo.
- Módulo “Job”: se crean, ejecutan y monitorean los distintos análisis sobre el modelo en el cual se trabaja. Cada uno de los análisis genera un archivo de resultados.
- Módulo “Visualization”: permite visualizar los resultados de análisis. Se obtienen diagramas de tensiones, desplazamientos y solicitaciones. Es necesario aplicar factores de escala para las deformaciones, se utiliza un factor 1 para la visualización general del modelo y 10 para la zona de corrosión analizada.

5.3 METODOLOGÍA

A partir del modelo general se modifican los espesores de los elementos de la malla de la envolvente donde se midieron reducciones de espesor por corrosión y los nodos de la

base del tanque en la virola inferior afectándolos por los descensos medidos. Se obtienen los diferentes modelos del tanque para representar distintas etapas de la vida útil del mismo. En cada uno de ellos se analiza el comportamiento de la estructura bajo la acción de viento considerando los siguientes estados:

- *Estado inicial:* sin daño por corrosión ni asentamientos diferenciales.
- *Estado actual:* considerando la corrosión medida y los asentamientos diferenciales evaluados en las mediciones sobre el tanque deformado.
- *Estado futuro:* representando el avance de la corrosión y el asentamiento diferencial.

Para el estudio se llevan a cabo distintos tipos de análisis: Análisis de Bifurcación Lineal (LBA), Análisis No Lineal Geométrico (GNLA), y Análisis No Lineal Geométrico con Imperfecciones (GNIA), implementados mediante la metodología de Riks. Las imperfecciones geométricas consideradas corresponden a la reducción de espesores por corrosión y asentamientos diferenciales.

Se busca analizar los efectos sobre la respuesta del tanque de la existencia de corrosión por un lado y los asentamientos diferenciales en el apoyo por otro. Se plantea su estudio considerando de manera aislada la influencia de la corrosión y de los asentamientos de la fundación. Posteriormente se combinan dichos efectos para obtener las respuestas generales en conjunto con la acción de la presión hidrostática del fluido y del viento.

5.4 INFLUENCIA DE LA REDUCCIÓN DE ESPESORES POR CORROSIÓN

Utilizando la documentación correspondiente a los resultados de las mediciones por ultrasonido y el esquema de la envolvente del tanque con sus accesorios se confecciona un plano a escala. Se observa que la longitud sobre el perímetro donde se encuentran las mediciones mide 14 m y tiene 1 m de altura. Se cree que los espesores medidos en sectores puntuales (cuadrículas de medición) son indicadores de lo que sucede en una zona mayor de afectación. Luego de analizar los valores de los espesores a la derecha e izquierda de la boca de inspección se subdividen de forma tal que existan 4 grupos de corrosión diferentes. Para realizar la división se considera la dimensión de los elementos de la malla de elementos finitos (0,5 m x 0,5 m) para poder seleccionarlos y agruparlos para colocarles el espesor correspondiente en el modelo. Se define como espesor en cada grupo la mínima medición de espesor del grupo. Quedan entonces conformados 4 grupos. Grupo 1 a 4 con espesores de 9,24 mm, 4,09 mm, 4,01 mm y 1,91 mm respectivamente como se muestra en la Figura 5.4:

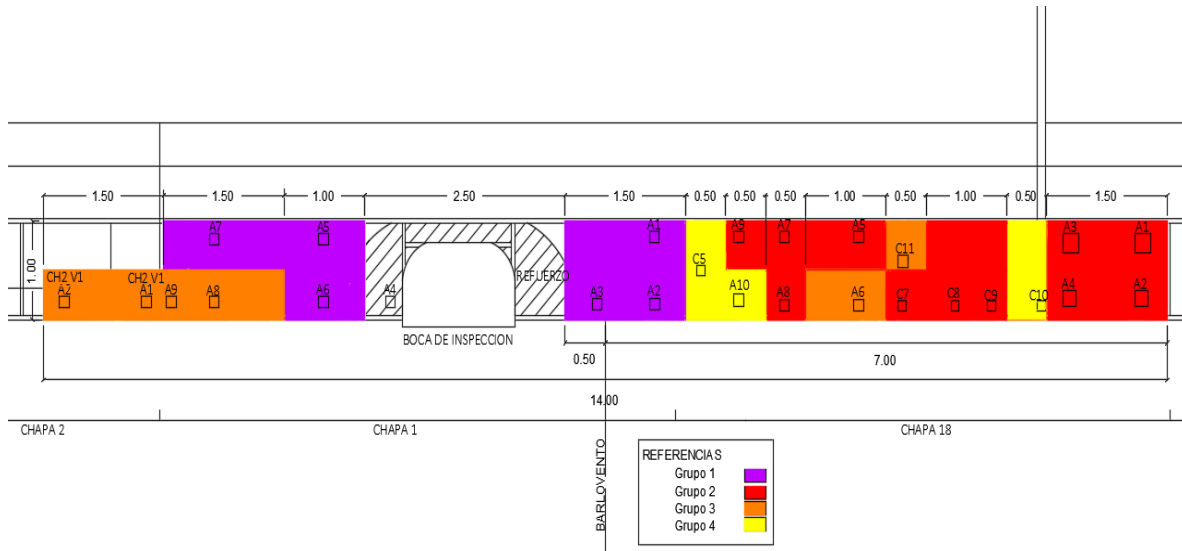


Figura 5.4: Grupos de espesores en la envolvente del tanque.

Para el modelado se ubica la zona afectada por corrosión coincidente con la porción del tanque a barlovento. Se asume que es la combinación más desfavorable para las cargas críticas.

Se obtienen los valores de las tensiones que actúan en sentido de paralelos, meridianos, tangenciales, principales y de Von Mises cuando actúa la carga de fluido y de nieve, balanceada o desbalanceada. La concentración de tensiones en la envolvente genera un avance del deterioro más rápido y que el estado del tanque empeore. No se consideran las tensiones correspondientes al techo ya que no se tiene información de la estructura del mismo y su función es de cerramiento, no estructural.

5.4.1 ANÁLISIS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Una disminución de espesor por corrosión puede generar concentración de tensiones en la zona afectada. Esto, a su vez, ocasiona que la tasa de corrosión en mm/año aumente. La presencia de nieve genera mayor compresión en la cáscara y la presencia de fluido el aumento de tensiones en la zona inferior del tanque por presión hidrostática. Por ello el análisis tensodeformacional se realiza contemplando como combinación de acciones: peso propio y presencia de fluido; peso propio, fluido y nieve balanceada y por último peso propio, fluido y nieve desbalanceada. Los resultados de tensiones y deformaciones se obtienen mediante un análisis lineal.

Tanto para desplazamientos como para las tensiones, al actuar la nieve los valores aumentan, pero la diferencia es despreciable. Se resumen los resultados correspondientes a la sollicitación de peso propio y presencia de fluido.

En la Figura 5.5 se muestran los desplazamientos en el estado inicial del tanque, sin corrosión. Los mismos aumentan hacia la parte inferior del tanque donde la presión

hidrostática es mayor. El valor máximo es del orden del centímetro y del espesor de la cáscara (0,01 m).

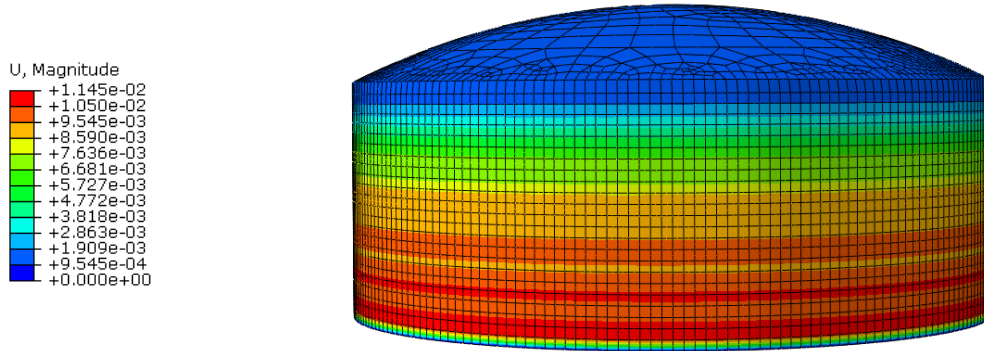


Figura 5.5: Desplazamientos en el estado inicial del tanque.

En la Figura 5.6 se muestran los desplazamientos correspondientes al estado actual del tanque con la corrosión medida. Se observa que al disminuir los espesores en dicho sector de la primera virola los desplazamientos aumentan como es esperado. Los valores son de un orden de magnitud mayor, llegan a 0,1 m.

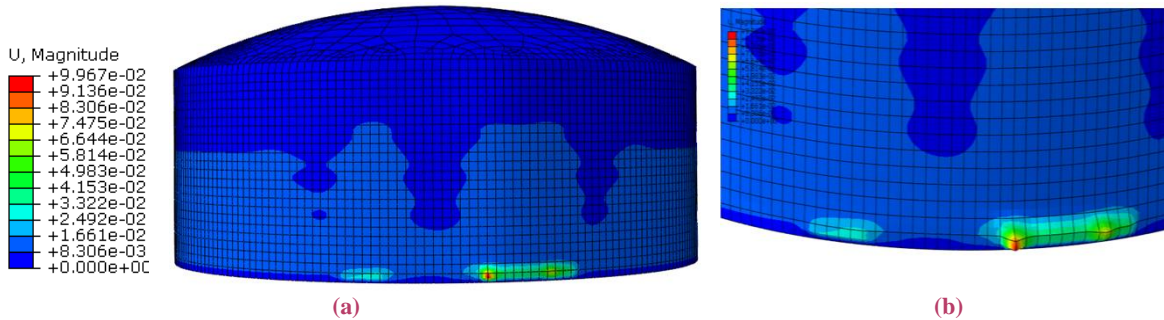


Figura 5.6: Desplazamientos en estado actual del tanque (corrosión medida), (a) Factor de deformación 1, (b) Factor de deformación 10.

Tensiones en dirección de paralelos (S11):

En la Figura 5.7 (a) se muestran las tensiones en la dirección de los paralelos en el estado inicial del tanque, sin corrosión. Las mismas aumentan hacia la parte inferior del tanque donde la presión hidrostática es mayor. El valor máximo es del orden de 100 MPa (143 MPa de tracción). En la Figura 5.7 (b) se muestran las tensiones correspondientes al estado actual del tanque, con la corrosión medida. Se observa que al disminuir los espesores en dicho sector de la primera virola las tensiones aumentan como es esperado. Los valores son de un orden de magnitud mayor, llegan a 1480 MPa de tracción.

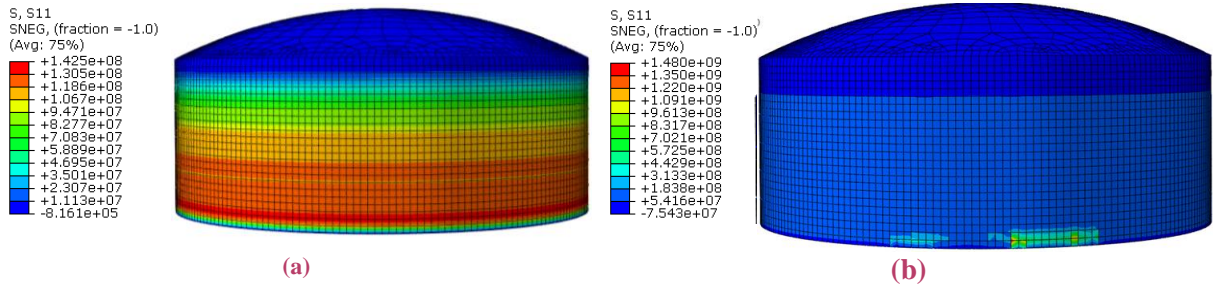


Figura 5.7: Tensiones S11: (a) Estado inicial del tanque, (b) Estado actual del tanque (corrosión medida).

Tensiones en dirección de meridianos (S22):

En la Figura 5.8 (a) se muestran las tensiones en la dirección de los meridianos en el estado inicial del tanque, sin corrosión. Las mismas aumentan hacia la parte inferior del tanque donde la presión hidrostática es mayor. El valor máximo es del orden de 100 MPa (99 MPa de compresión). En la Figura 5.8 (b) se muestran las tensiones correspondientes al estado actual del tanque, con la corrosión medida. Se observa que al disminuir los espesores en dicho sector de la primera virola las tensiones aumentan como es esperado. Los valores son de un orden de magnitud mayor, llegan a 680 MPa de compresión.

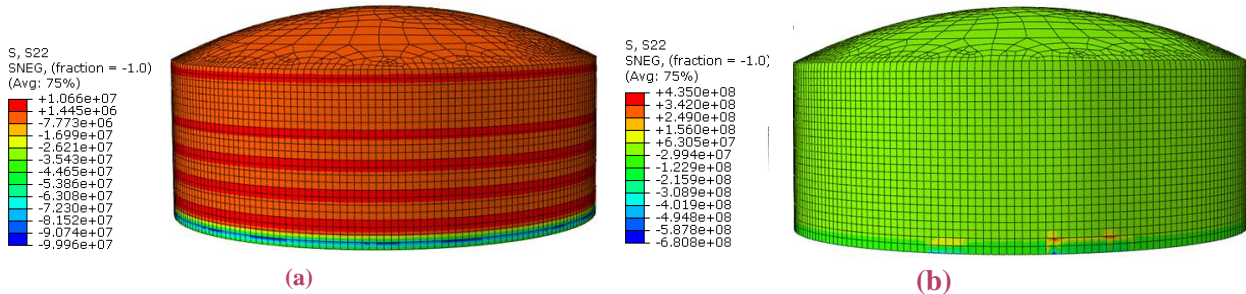


Figura 5.8: Tensiones S22 a) Estado inicial del tanque, b) Estado actual del tanque (corrosión medida).

Tensiones tangenciales (S12):

Las tensiones S12 tangenciales son despreciables frente a las paralelas y meridionales a la envolvente. Teóricamente no se consideran por la simetría rotatoria de la cáscara.

Tensiones principales:

Las tensiones máximas principales positivas son coincidentes con las S11 máximas de tracción, en sentido de paralelos, y las máximas principales negativas son coincidentes con las S22 máximas de compresión, en sentido de meridianos. Esto significa que los planos normales a dichas tensiones son los planos principales para los elementos de cáscara de la envolvente.

Tensiones de Von Mises

En la Figura 5.9 (a) se muestran las tensiones de Von Mises para el estado inicial del tanque. Las mismas toman el valor de 180 MPa. En la Figura 5.9 (b) se observan las mismas para el estado actual del tanque y toman el valor de 1430 MPa. Se observa que a medida que disminuyen los espesores dichas tensiones superan la tensión de fluencia de 250 MPa y aumentan en un orden de magnitud con respecto al estado inicial.

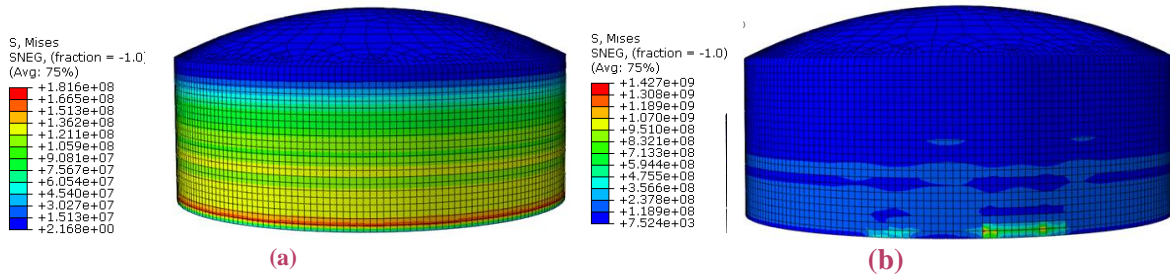


Figura 5.9: Tensiones de Von Mises: (a) Estado inicial del tanque, (b) Estado actual del tanque.

Si el patrón de corrosión se repite en el resto de la envolvente hasta abarcar todo el perímetro se obtienen los mismos resultados que en el estado actual con el deterioro únicamente a barlovento.

5.4.2 AVANCE DE CORROSIÓN

Se consideran dos posibles escenarios de propagación de corrosión ya que es poco probable que se presente corrosión solamente en el sector medido. En una primera etapa se plantea el avance de la corrosión evaluando una reducción gradual de los espesores en la región estudiada hasta llegar al valor mínimo medido (1,91 mm). A partir de allí se reduce el espesor de cada grupo en 0,3 mm hasta obtener un espesor menor a 1 mm en cada grupo: 0,7 mm.

En una segunda etapa se evalúa el avance de la corrosión hacia los laterales de la zona estudiada. Para ello se repite el patrón de corrosión del sector circular medido (longitud de arco 14 m) de forma alterna hacia cada lado. Se conforman distintos sectores circulares (aumentando la longitud de arco) hasta que la corrosión abarca todo el perímetro. Cuando toda la envolvente queda cubierta por el patrón se reduce el espesor de cada grupo en 0,3 mm hasta obtener un espesor de 0,7 mm en cada grupo, como se realiza en el primer escenario de corrosión a barlovento. En la Figura 5.10 (a) se muestra la vista en planta del tanque y en la Figura 5.10 (b) la vista frontal de la envolvente indicando en ambas el avance de la corrosión sobre el perímetro.

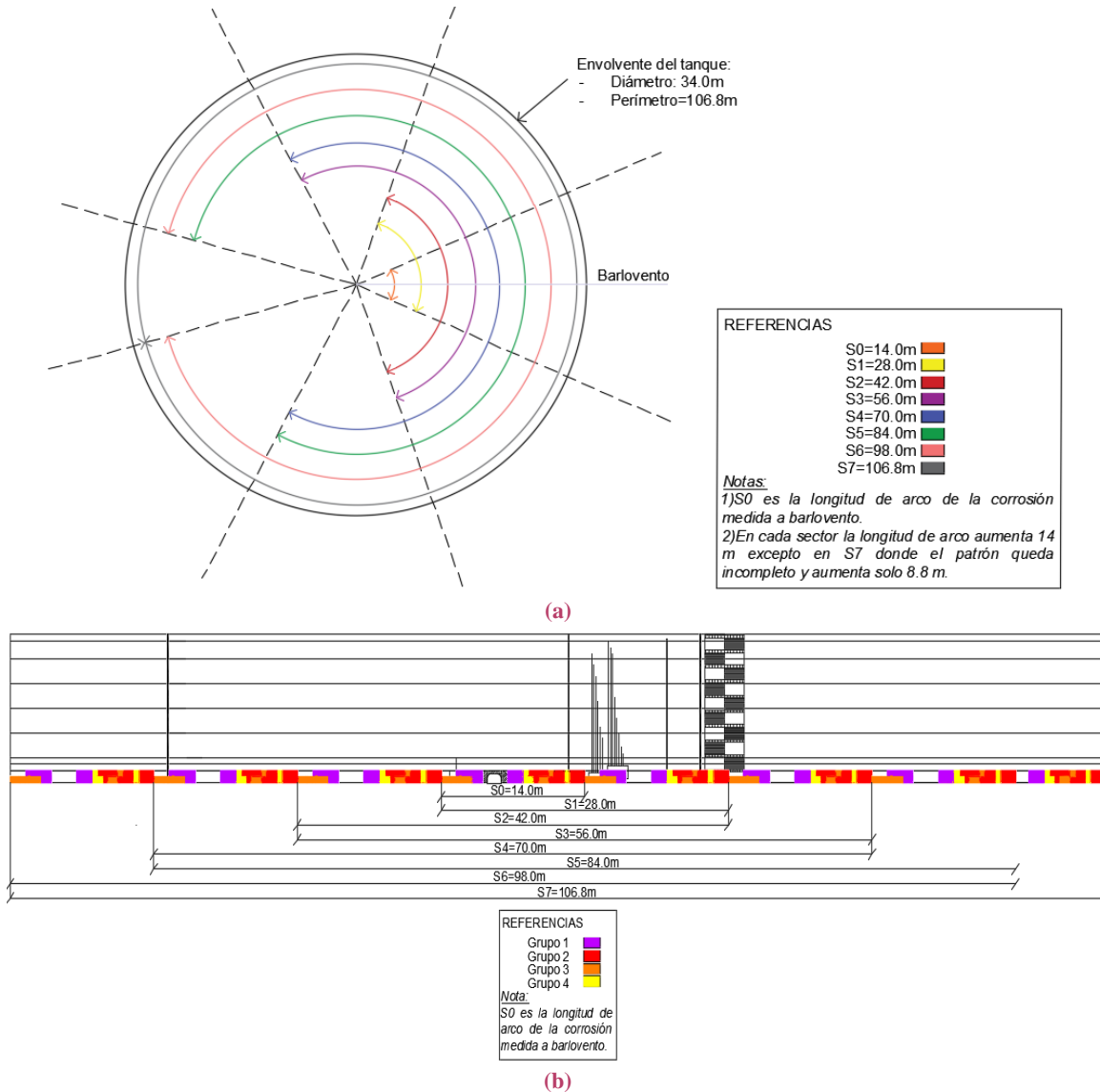


Figura 5.10: Esquema avance de corrosión: (a) Vista en planta del tanque, (b) Vista frontal de la envolvente.

5.4.3 ANÁLISIS DE BIFURCACIÓN COMBINANDO CORROSIÓN Y VIENTO

El Análisis de Bifurcación Lineal (LBA) mediante autovalores y autovectores permite obtener las cargas críticas y los modos críticos asociados. Éstos son una primera aproximación a los valores en que pueden aparecer problemas de inestabilidad del equilibrio.

Se considera la condición de carga más desfavorable para el pandeo de la cáscara del tanque. El mismo ocurre cuando el tanque se encuentra vacío con la carga de viento actuando. Se analiza el valor de la carga crítica mediante el autovalor obtenido para dicha situación y la velocidad de viento asociada utilizando la ecuación [4.5].

A partir del modelo del tanque en estado inicial sin fluido se logra obtener la carga crítica teórica de $1,95 \text{ kN/m}^2$, mostrando la primera forma de modo en la Figura 5.11. El pandeo ocurre a barlovento. Al relacionar dicha carga con la velocidad del viento equivalente a partir de la ecuación [4.5] se obtiene una velocidad de colapso teórica de $52,6 \text{ m/s}$, velocidad inferior a la velocidad básica de viento del reglamento CIRSOC 102 (2005) de 62 m/s .

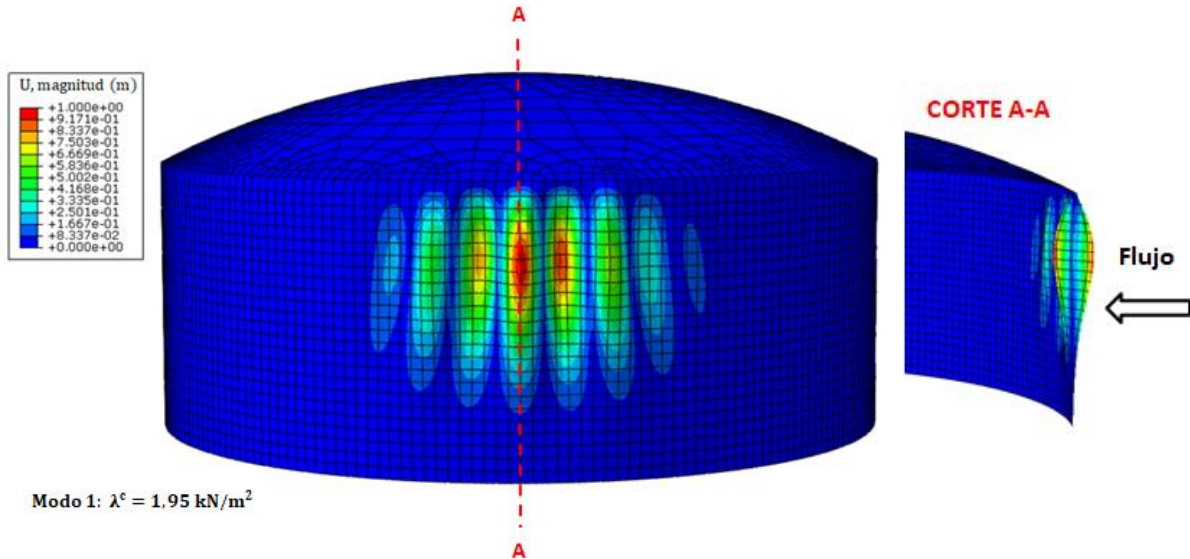


Figura 5.11: Forma de modo crítico para el tanque en estado inicial bajo viento ($\lambda^c = 1,95 \text{ kN/m}^2$).

Para el modelo del tanque en estado actual, afectado por corrosión, la carga crítica disminuye levemente, se mantiene la forma de modo y la carga crítica asociada es de $1,94 \text{ kN/m}^2$. Al relacionar esta carga con la velocidad del viento equivalente se obtiene una velocidad de colapso teórica de $52,5 \text{ m/s}$, nuevamente inferior a la básica reglamentaria.

Al modelar el tanque en estado futuro con reducciones graduales de espesor por corrosión en la zona medida, cuando los espesores en los grupos son de $4,84 \text{ mm}$, $2,78 \text{ mm}$, $2,75 \text{ mm}$ y $1,91 \text{ mm}$ respectivamente hay un cambio en la forma de modo como se muestra Figura 5.12. En este caso, se observa que el pandeo sucede en la zona con disminución de espesor y la carga crítica asociada es de $1,85 \text{ kN/m}^2$. Al relacionar esta carga con la velocidad del viento equivalente se obtiene una velocidad de colapso teórica de $51,3 \text{ m/s}$, nuevamente inferior a la básica reglamentaria.

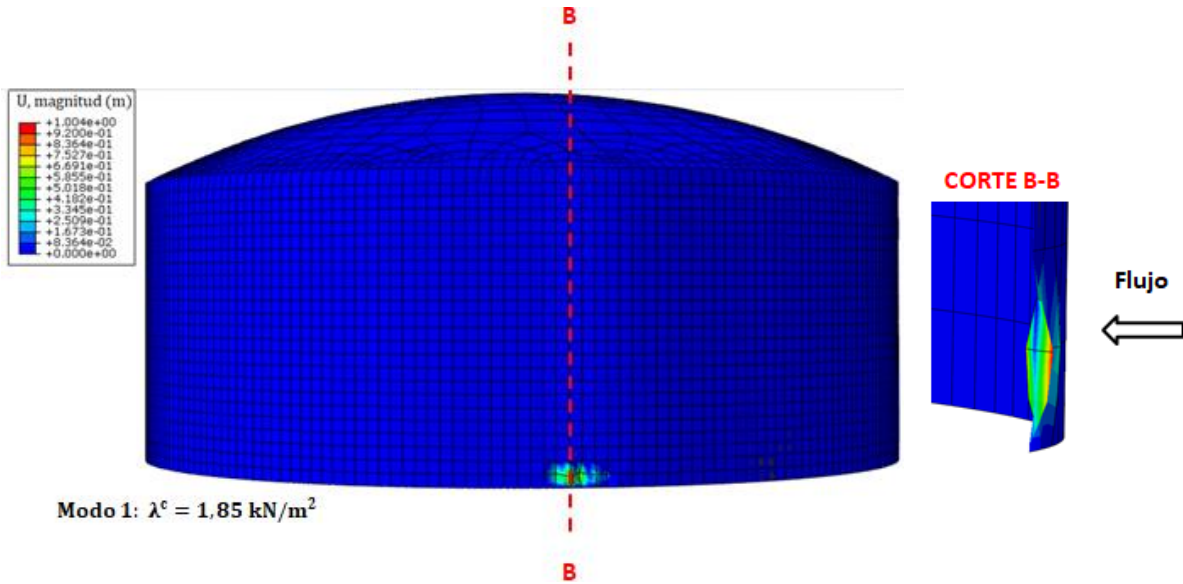


Figura 5.12: Forma de modo crítico con espesor reducido en zona medida ($\lambda^c = 1,85 \text{ kN/m}^2$).

Al continuar reduciendo los espesores en la zona medida, se mantiene la forma de modo con reducción gradual en la carga crítica asociada hasta llegar al espesor de 0,71 mm en toda la zona, con una velocidad crítica asociada de 10,9 m/s.

En todos los análisis suponiendo que la disminución de espesor avanza hacia todo el perímetro en el modelo del estado futuro del tanque, la variación de los modos, cargas y velocidades críticas con respecto a las obtenidas cuando la zona afectada por corrosión se encuentra solo a barlovento es despreciable. Se verifica la hipótesis adoptada inicialmente de que el caso más desfavorable ocurre al superponer la zona crítica con la porción a barlovento. Se resume en la Tabla 5.1 todos los resultados de cargas y velocidades críticas obtenidos cuando la corrosión se encuentra a barlovento.

ESPESOR (mm)				RESULTADOS LBA A BARLOVENTO	
GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3	GRUPO 4	CARGA CRITICA (N/m2)	VELOCIDAD CRITICA (m/s)
13.60	13.60	13.60	13.60	1947.80	52.63
9.24	4.09	4.01	1.91	1937.10	52.49
7.77	3.65	3.59	1.91	1935.60	52.47
6.31	3.22	3.17	1.91	1934.00	52.44
4.84	2.78	2.75	1.91	1850.60	51.30
3.38	2.35	2.33	1.91	1407.10	44.73
1.91	1.91	1.91	1.91	910.82	35.99
1.61	1.61	1.61	1.61	571.87	28.52
1.31	1.31	1.31	1.31	333.94	21.79
1.01	1.01	1.01	1.01	177.45	15.89
0.71	0.71	0.71	0.71	83.10	10.87

Tabla 5.1: Resultados de cargas y velocidades críticas con la corrosión a barlovento.

Se indica en rojo la fila en la cual se observa el cambio en la forma de modo con los espesores mencionados.

5.5 INFLUENCIA DE LOS ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN EL APOYO

Se modela el tanque considerando solamente los desplazamientos medidos mostrados en el Capítulo 3. Se asume que las mediciones pueden simplificarse en dos zonas donde los desplazamientos aumentan siguiendo una función lineal y otra donde siguen una función constante con el máximo desplazamiento medido. Se obtienen los valores del desplazamiento vertical a colocar en cada nodo de la longitud de arco donde se encuentra el asentamiento medido. Como los elementos de la malla miden 0,5 x 0,5 m, en los nodos de la izquierda (longitud de arco de 4 m) el valor del asentamiento comienza en 0 y aumenta en 0,0125 m hasta llegar al valor máximo de 0,1 m. En los nodos de la derecha (longitud de arco de 2 m) comienza en 0,1 m y disminuye en 0,025 m hasta llegar a 0 m. En todos los nodos centrales se coloca el valor máximo medido de 0,1 m. La longitud de arco total asentada es de 16 m. En el resto de los nodos no asentados se mantienen las condiciones de borde iniciales. En la Figura 5.13 se muestra el modelado de asentamientos en el software.

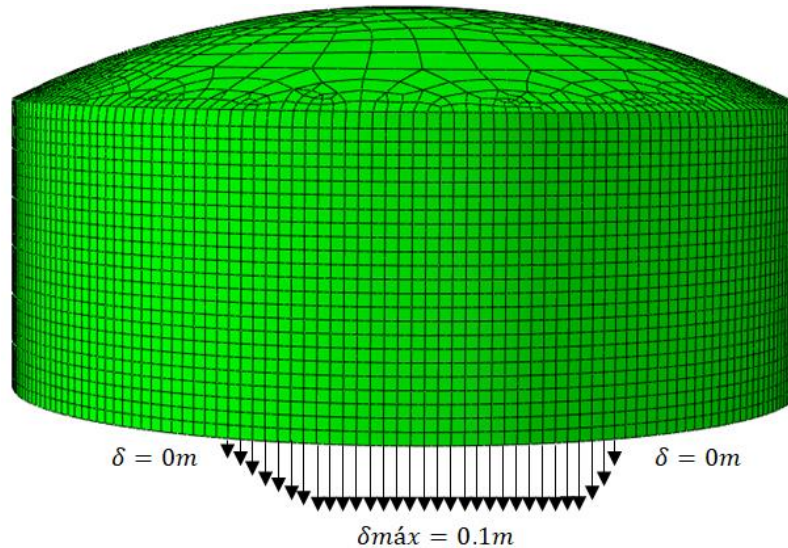


Figura 5.13: Modelado de asentamientos en ABAQUS (2006).

5.5.1 ANÁLISIS DE BIFURCACIÓN (LBA)

En un principio se realiza un análisis LBA (Buckle) para identificar los valores de asentamiento para los cuales ocurren problemas de inestabilidad del equilibrio estructural. En la Figura 5.14 se muestra la forma de modo crítico con los asentamientos medidos. La carga crítica del primer modo obtenido es 0,232 por lo cual el pandeo ocurre para aproximadamente el 20% del máximo desplazamiento medido (20 mm). Esto es esperado por el elevado valor de las mediciones. Dicho valor es del orden de magnitud del espesor de la cáscara.

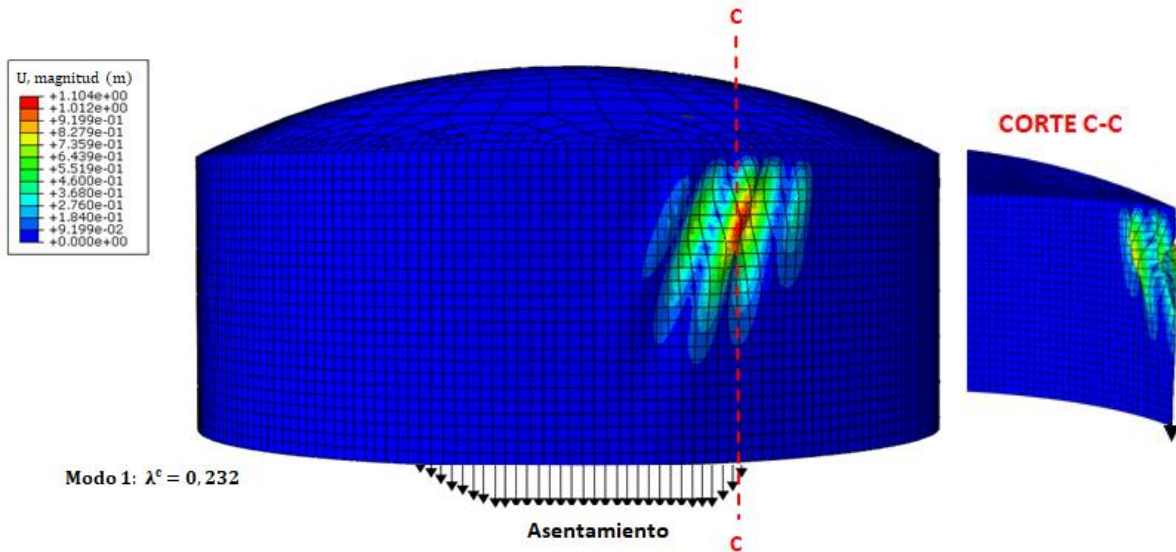


Figura 5.14: Forma de modo crítico con asentamientos medidos ($\lambda^c = 0,232$).

Se observa que los descensos verticales producen abolladuras en la superficie entrantes y salientes de forma aproximadamente elíptica en los meridianos. Dichas abolladuras son coincidentes con la porción del tanque en donde se encuentran los asentamientos con mayor variación lineal.

Como el pandeo de la estructura ocurre para un valor bajo de carga crítica el análisis debe realizarse en el campo poscrítico. Como se explica en el Capítulo 2 el proceso de pandeo puede ser inesperado o de bifurcación. En ambos casos el análisis se realiza con la teoría no lineal geométrica ya que el tanque cambia su forma para continuar resistiendo. Hay un cambio en la matriz de rigidez global del sistema al aplicar la sollicitación externa.

5.5.2 ANÁLISIS NO LINEAL GEOMÉTRICO (GNLA)

Se reducen los desplazamientos medidos a la mitad de su valor y se realiza un Análisis No Lineal Geométrico (GNLA) con el Método de Riks para obtener la trayectoria poscrítica del nodo con mayor desplazamiento fuera del plano. Dicho método permite obtener soluciones de equilibrio controlando en cada incremento la curva carga-desplazamiento. En la Figura 5.15 se muestra el nodo A con el mayor desplazamiento en Riks.

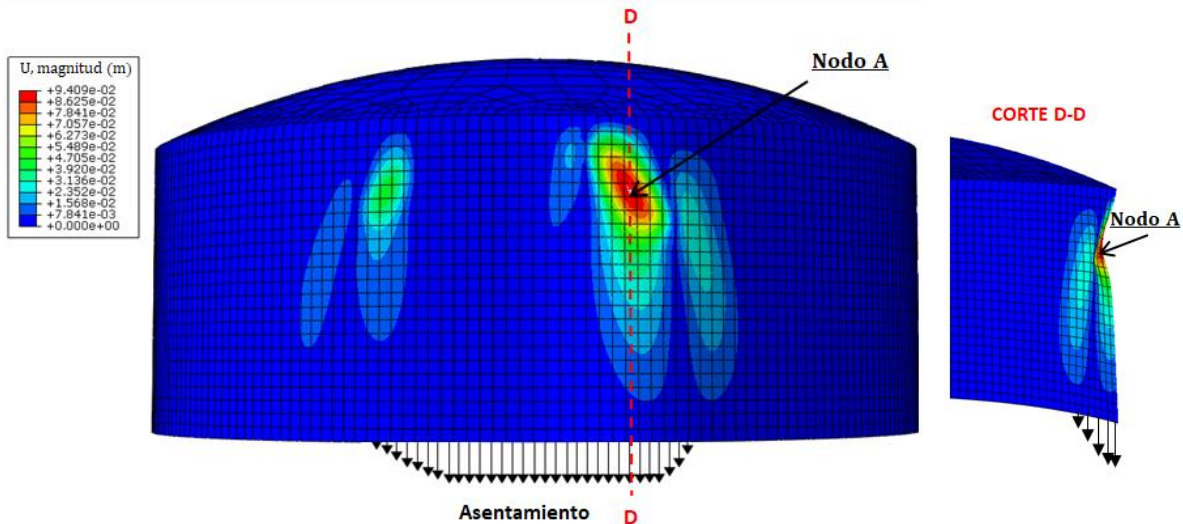


Figura 5.15: Deformada bajo sollicitación de asentamientos verticales (Nodo A: mayor desplazamiento fuera del plano).

Se observa que el nodo que tiene el mayor desplazamiento fuera del plano se encuentra ubicado en uno de los meridianos que sufre el mayor descenso vertical. Las formas de las abolladuras son elípticas. Los desplazamientos aumentan hacia la parte superior del tanque donde hay mayor rigidez por la presencia del techo fijo.

A los efectos de poder comparar metodologías de evaluación, se realiza un análisis lineal y no lineal geométrico. En la Figura 5.16 se observan las trayectorias de equilibrio para el Nodo A obtenidas con cada análisis, en función del desplazamiento vertical de uno de los nodos del apoyo del sector con mayor asentamiento. En la Figura 5.6 (a) se muestra la etapa inicial de la trayectoria incluyendo una evaluación lineal, no lineal geométrica planteada por la metodología standard y por el método de Riks.

Se observa que la trayectoria fundamental de equilibrio es lineal solo en la porción inicial de la curva hasta un valor del desplazamiento vertical de 1 mm y fuera del plano de 5 mm aproximadamente. El Análisis No Lineal Geométrico implementado por la metodología standard disponible en ABAQUS (Método de Euler) permite evaluar la trayectoria inicial no lineal pero no es capaz de identificar el cambio de trayectoria acompañando la evolución de los desplazamientos más allá de esa etapa inicial. El desplazamiento fuera del plano aumenta con el descenso vertical, luego comienza a descender y cuando el desplazamiento vertical es de 2,5 mm la trayectoria fundamental se cruza con otra trayectoria de equilibrio poscrítica (secundaria) que no estaba presente en el origen del proceso de carga. El pandeo es de bifurcación y el orden de los desplazamientos diferenciales es del milímetro, de un orden de magnitud menor que el espesor de la cáscara en dicho sector. El punto de intersección es el punto de bifurcación y es el estado crítico de la estructura.

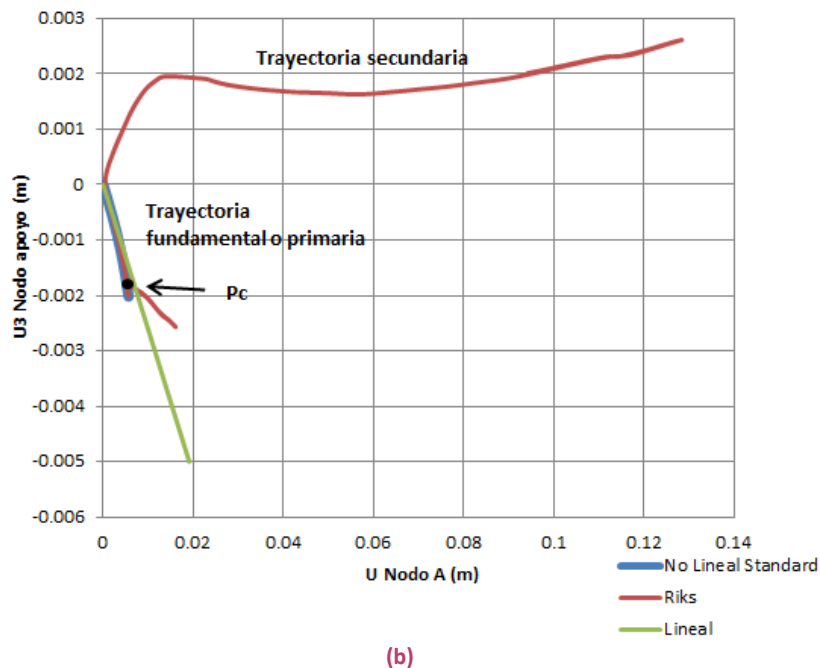
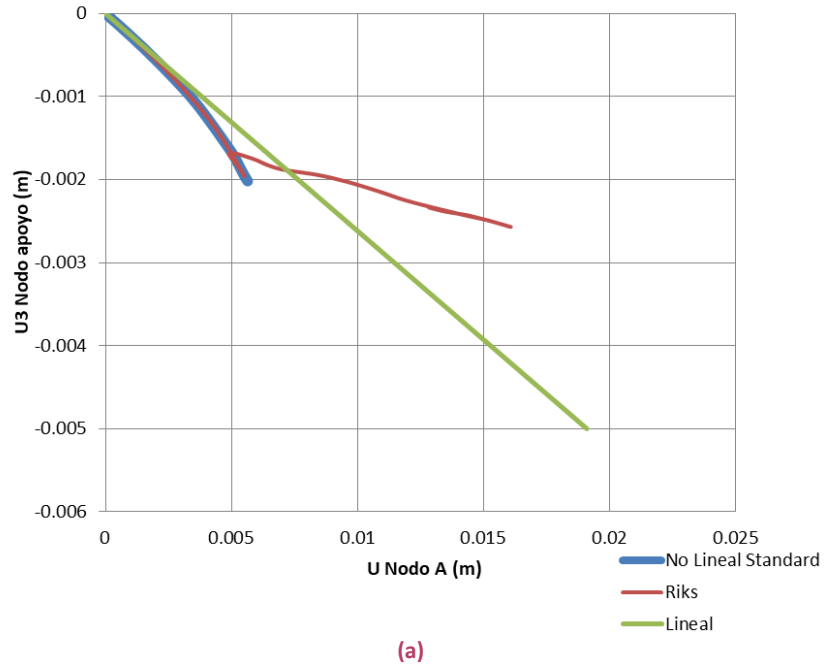


Figura 5.16: Trayectoria de equilibrio bajo sollicitación de asentamientos para el nodo con mayor desplazamiento fuera del plano (Nodo A), (a) Etapa inicial, (b) Etapa poscrítica avanzada.

El método de Riks permite evaluar estos cambios en la trayectoria de equilibrio y resulta el análisis adecuado para obtener el comportamiento del Nodo A exhibiendo la respuesta poscrítica avanzada de la respuesta estructural. Los desplazamientos del apoyo se invierten y el desplazamiento del nodo A aumenta indefinidamente por lo cual el equilibrio es inestable, llevando al colapso futuro de la estructura.

5.5.3 ANÁLISIS COMBINANDO ASENTAMIENTOS Y VIENTO

Para este análisis se considera que el sector donde se encuentran los asentamientos medidos está ubicado a barlovento ya que por los análisis realizados para corrosión se sabe que es la situación más desfavorable para los modos críticos.

Al realizar el estudio de autovalores y autovectores (LBA), se obtiene el mismo modo crítico que el mostrado en la Figura 5.14 y la carga crítica resulta $0,232 \text{ kN/m}^2$ ocurriendo el pandeo de la cáscara para un desplazamiento de 20 mm. El pandeo del tanque ocurre previamente a estar solicitado por la carga de viento.

Una imperfección desvía a la estructura de su geometría perfecta. La misma destruye el punto de bifurcación y se obtiene una nueva trayectoria de equilibrio. Se realiza el Análisis No Lineal Geométrico con Imperfecciones (GNIA) para encontrar la nueva trayectoria cuando actúa la carga de viento sobre la estructura. En la Figura 5.17 se muestra la deformada de la estructura indicando el nodo con mayor desplazamiento fuera del plano cuando además de los asentamientos actúa la sollicitación de viento (nodo B).

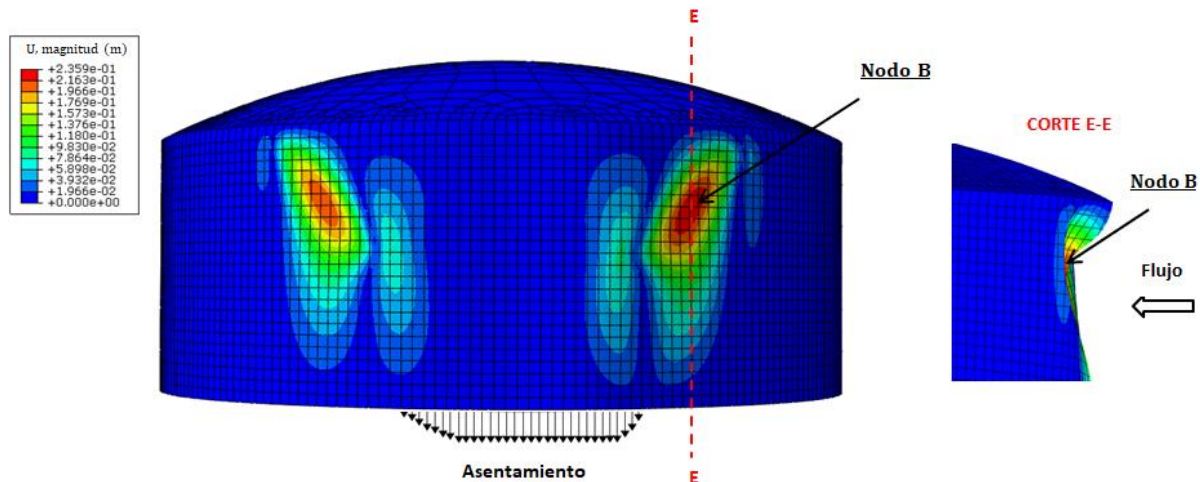


Figura 5.17: Deformada bajo sollicitación de viento y asentamientos verticales (Mayor desplazamiento en Nodo B).

Se observa que en este caso las abolladuras con el mayor desplazamiento ya no se encuentran sobre los meridianos que sufren el descenso vertical. Nuevamente adoptan una forma inclinada. En la Figura 5.18 se muestra el parámetro amplificador de las cargas en función del desplazamiento fuera del plano del nodo B. Se observa que a medida que aumenta el parámetro aumenta el desplazamiento en el Nodo B. Cuando el desplazamiento es de 18 mm el sistema adopta una trayectoria secundaria que interseca a la fundamental en el punto de bifurcación. En ese momento el parámetro amplificador de las cargas es $0,2 \text{ kN/m}^2$. Luego los desplazamientos aumentan indefinidamente por lo cual el equilibrio es inestable.

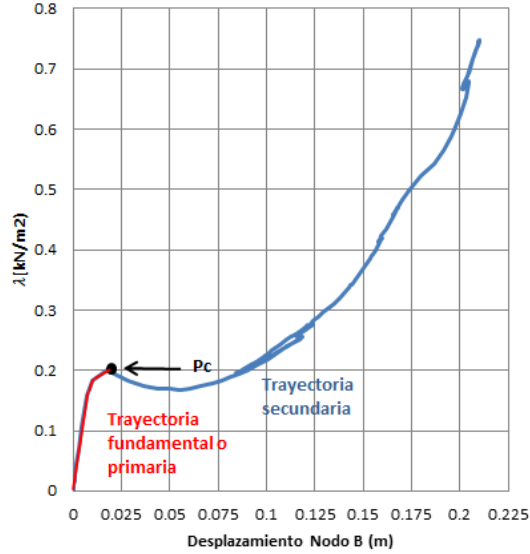


Figura 5.18: Trayectoria de equilibrio bajo sollicitación de viento y asentamientos verticales (Nodo B).

5.6 ANÁLISIS DEL TANQUE EN ESTADO ACTUAL

Se modela la corrosión y asentamientos medidos para realizar los análisis correspondientes.

Se realiza el Análisis de Bifurcación Lineal (LBA) sin considerar la sollicitación de viento para identificar la inestabilidad del equilibrio. En la Figura 5.19 se muestra el modo crítico para el cual ocurre el pandeo de la estructura.

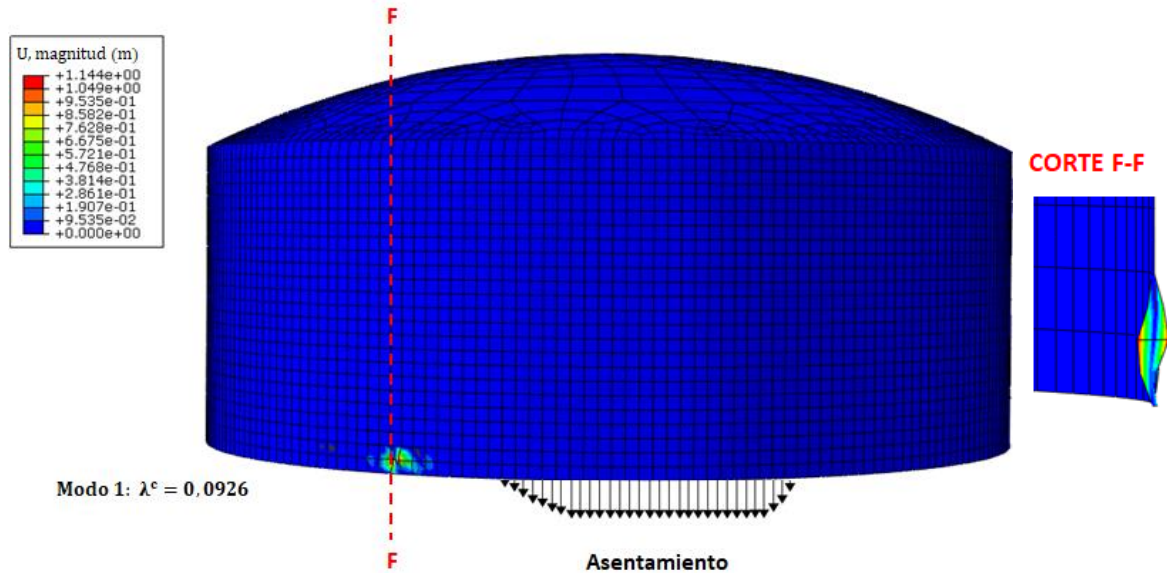


Figura 5.19: Forma de modo crítico con corrosión y asentamientos medidos ($\lambda^C = 0,0926$).

Se observa que las abolladuras ocurren en la virola inferior donde se encuentra la reducción de espesor. Su ubicación se encuentra desplazada respecto a los meridianos que tienen el descenso vertical y no presentan inclinación como en los casos anteriores. El factor de proporcionalidad es 0,0926. Como el asentamiento máximo modelado es 0,05 m el pandeo ocurre para un 9% de dicho valor, es decir, cuando el desplazamiento vertical es de 5 mm. Dicho valor es muy inferior al asentamiento máximo medido y del orden de los espesores reducidos por corrosión.

Mediante el método de Riks ocurre que el nodo con mayor desplazamiento fuera del plano es coincidente con el caso obtenido para cuando solamente existen asentamientos diferenciales de la base (Nodo A en la Figura 5.15). El análisis GNIA es más adecuado que LBA para representar el comportamiento y la respuesta es similar al caso sin corrosión.

Al considerar la sollicitación de viento en el análisis LBA, el modo y carga crítica para el cual ocurre el pandeo de la estructura coincide con el obtenido en la Figura 5.19 (asentamientos y corrosión actual sin sollicitación de viento).

En el análisis GNIA el nodo con mayor desplazamiento fuera del plano es coincidente con el caso obtenido para cuando solamente existen asentamientos diferenciales de la base (Nodo B en la Figura 5.17). Lo mismo ocurre con el parámetro amplificador de las cargas. A medida que aumenta el parámetro, aumenta el desplazamiento en el Nodo B, el sistema adopta una trayectoria secundaria que intercepta a la fundamental en el punto de bifurcación donde el desplazamiento es 18 mm y $\lambda=0,2 \text{ kN/m}^2$. Posteriormente los desplazamientos aumentan indefinidamente por lo cual el equilibrio es inestable.

Análisis de tensiones:

Se obtiene la magnitud de los desplazamientos y las tensiones de Von Mises para el estado poscrítico avanzado utilizando el método de Riks, como se muestra en la Figura 5.20. Se acota la escala de tensiones a partir del valor de la tensión de fluencia (250 MPa). Para un desplazamiento vertical de 0,01 m (sector a barlovento con presencia de asentamientos y corrosión) las tensiones de Von Mises alcanzan el valor de 610 MPa. En la zona de mayores desplazamientos aparece plastificación asociada a tensiones superiores a la tensión de Von Mises y deformaciones permanentes.

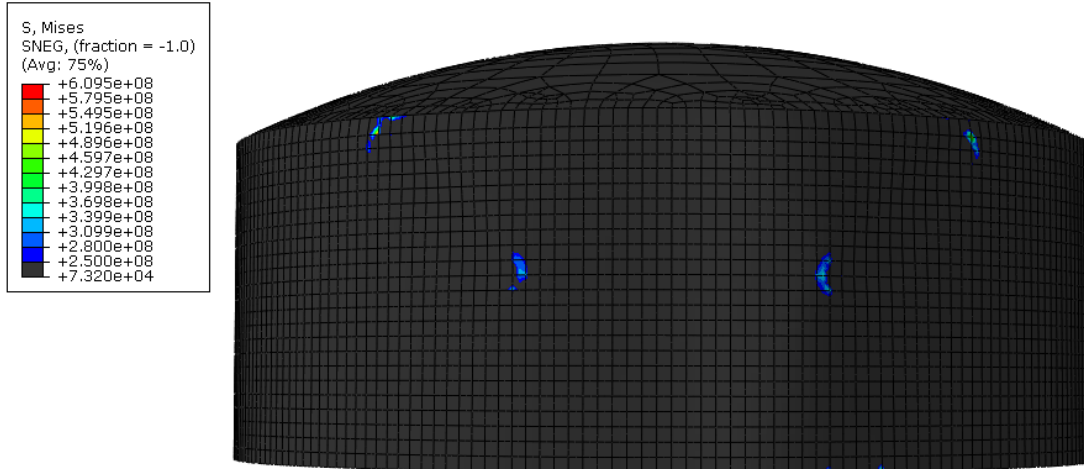


Figura 5.20: Resultados de tensiones de Von Mises para el estado poscrítico avanzado (asentamientos diferenciales y corrosión medida a barlovento).

La forma que adoptan las tensiones de Von Mises es inclinada y elíptica como ocurre con las abolladuras. Los valores máximos de desplazamiento coinciden con la ubicación de las mismas.

5.7 ANÁLISIS DEL TANQUE EN ESTADO FUTURO

Se modela el tanque considerando: asentamientos diferenciales de la base y espesor mínimo medido a barlovento adoptado en todos los grupos de corrosión (1,91 mm), combinado con la influencia de viento. Como se explica anteriormente, cuando la zona afectada se encuentra a barlovento es más desfavorable que extrapolar la corrosión al resto de la envolvente.

En la Figura 5.21 se muestra la forma de modo crítico del análisis LBA con los asentamientos y espesor mínimo medido cuando no está presente la sollicitación de viento. El resultado para la carga crítica del primer modo es $\lambda^C = 0,0353$ por lo cual el pandeo ocurre para un 3% del desplazamiento máximo. Al modelar la mitad del desplazamiento medido (0,05 m), la inestabilidad sucede para aproximadamente 1,7 mm de desplazamiento vertical, valor muy inferior al descenso real del apoyo y prácticamente del mínimo espesor medido.

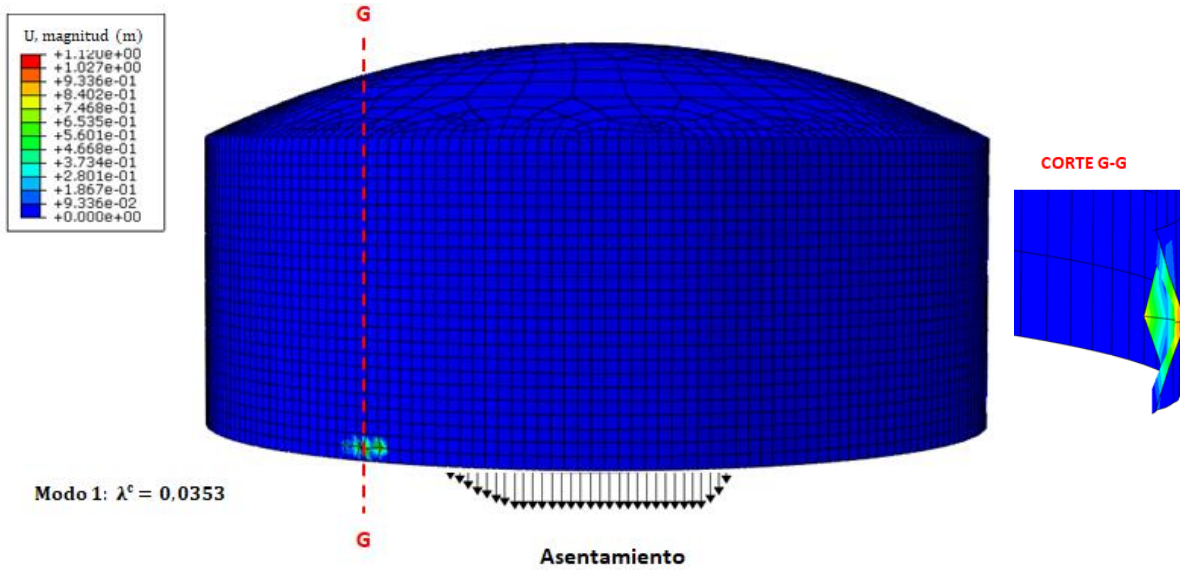


Figura 5.21: Forma de modo crítico con asentamientos y espesor mínimo medido ($\lambda^c = 0,0353$).

Las abolladuras se encuentran sobre la primera virola donde hay reducción de espesor por corrosión. Los meridianos de su ubicación no coinciden con los que presentan el descenso vertical. No adoptan forma inclinada.

Cuando se considera la sollicitación de viento en el análisis LBA, la forma de modo crítico obtenida coincide con el de la Figura 5.21 cuando no se considera la influencia de dicha carga en la estructura. El pandeo ocurre previamente al actuar la carga de viento.

Se realiza el análisis GNIA mediante el método de Riks. En la Figura 5.22 se muestra la deformada indicando el nodo con mayor desplazamiento fuera del plano para el estado del tanque analizado (Nodo C) bajo la sollicitación de viento.

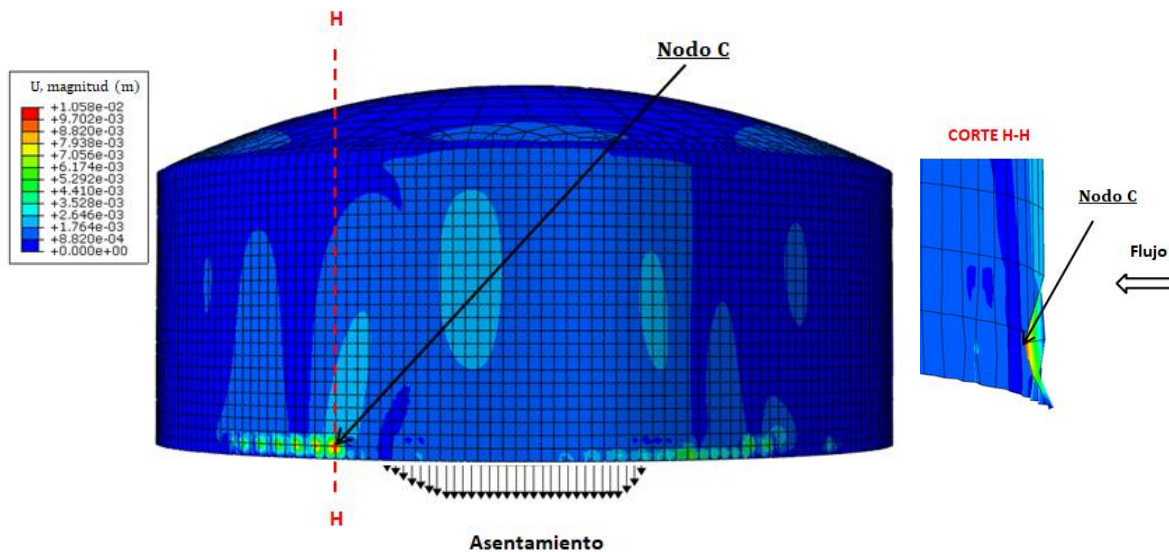


Figura 5.22: Deformada bajo sollicitación de asentamientos verticales, espesor mínimo medido y viento (Nodo C).

En la Figura 5.23 se muestra el parámetro amplificador de las cargas en función del desplazamiento fuera del plano del nodo C. Se observa que a medida que aumenta el parámetro, aumenta el desplazamiento en el Nodo C. Cuando el desplazamiento es de 0,3 mm el sistema adopta una trayectoria secundaria que intercepta a la fundamental en el punto de bifurcación. En ese momento el parámetro amplificador de las cargas es 0,03 kN/m² aproximadamente. Posteriormente los desplazamientos aumentan indefinidamente por lo cual el equilibrio es inestable. Los desplazamientos son de un orden de magnitud menor que el espesor de la virola.

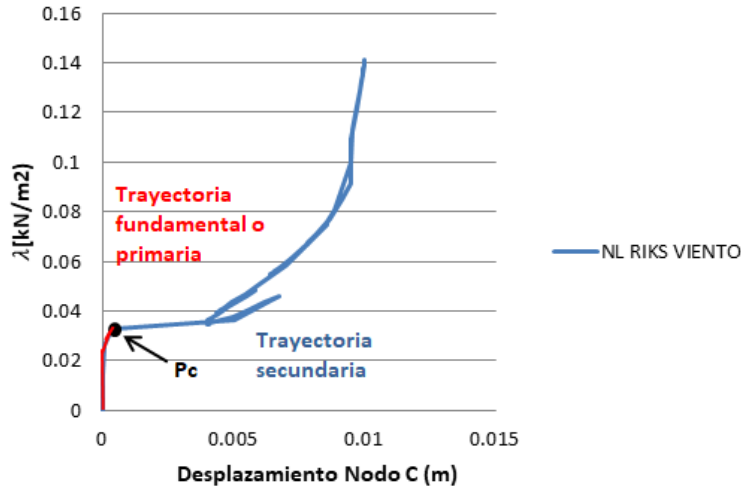


Figura 5.23: Trayectoria de equilibrio en el estado futuro del tanque bajo sollicitación de viento (Nodo C).

5.8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tanque en estado inicial:

Se considera la presencia de peso propio y fluido (más desfavorable para el análisis tensodeformacional) y de peso propio y viento para el LBA. La nieve en el techo genera mayor compresión en la cáscara pero la diferencia es despreciable. Los desplazamientos son del orden del espesor de la virola sin corrosión y son mayores donde la presión hidrostática es mayor, en la parte inferior del tanque.

La velocidad de viento para el estado crítico es menor a la que presenta el reglamento CIRSOC 201 (2005) para Santa Cruz de 62 m/s. El diseño del tanque no cumple con la normativa que rige para nuestro país. Se confirma que el mismo fue diseñado siguiendo otro reglamento, es un tanque de origen ruso.

Los desplazamientos obtenidos son del orden del espesor de la cáscara. Por ello es correcto obtener el comportamiento con un análisis lineal.

Influencia de la corrosión:

Una disminución de espesor por corrosión genera concentración de tensiones en la zona afectada. Esto a su vez, ocasiona que la tasa de corrosión en mm/año aumente.

El caso más desfavorable para el tanque en cuanto al pandeo de la cáscara ocurre cuando el mismo se encuentra vacío con la solicitación de viento. Para el análisis tensodeformacional el caso más desfavorable es la combinación de peso propio y fluido. La presencia de nieve genera mayor compresión en la cáscara (la diferencia es despreciable) y la presencia de fluido, el aumento de tensiones en la zona inferior del tanque por presión hidrostática.

Es despreciable la variación en los resultados de los análisis cuando la corrosión se extiende abarcando todo el perímetro del tanque o solamente se encuentra a barlovento.

Las cargas críticas de viento obtenidas a medida que se reducen los espesores descienden y son inferiores a la básica reglamentaria establecida en CIRSOC 102 (2005), para 62 m/s. Los modos de pandeo y abolladuras adoptan una forma elíptica y vertical en la zona a barlovento.

Los desplazamientos obtenidos son de un orden mayor que el espesor de la cáscara.

Al disminuir los espesores por corrosión, las tensiones meridionales y paralelas aumentan. Las tensiones de Von Mises aumentan en un orden de magnitud y son mayores a las de fluencia. Esto indica la aparición de plastificación en sectores de la envolvente.

Influencia de los asentamientos diferenciales:

Los resultados obtenidos para el descenso vertical con ambos tipos de análisis (lineal y no lineal geométrico) coinciden aproximadamente para un pequeño rango de valores del asentamiento vertical (del orden del espesor de la cáscara). Cuando crece el asentamiento, los máximos desplazamientos fuera del plano se alejan significativamente de la solución lineal. Se obtiene que para un 20% del valor del asentamiento máximo medido la estructura se encuentra en estado poscrítico con un equilibrio inestable. Los desplazamientos aumentan indefinidamente llevando al futuro colapso.

El valor del desplazamiento obtenido para GNLA en el punto de bifurcación coincide con el que arroja el primer modo obtenido mediante el análisis LBA.

Se observa una forma inclinada y elíptica en las abolladuras que se encuentran ubicadas en coincidencia con los meridianos que tienen el asentamiento vertical. La forma que adoptan puede deberse al asentamiento asimétrico que presenta la estructura.

Los desplazamientos fuera del plano aumentan hacia la parte superior del tanque. Esto puede suceder por la rigidez que otorga el techo de cerramiento.

Cuando la estructura está solicitada por la carga de viento las abolladuras dejan de ser coincidentes con los meridianos asentados, como se muestra en la Figura 5.24:

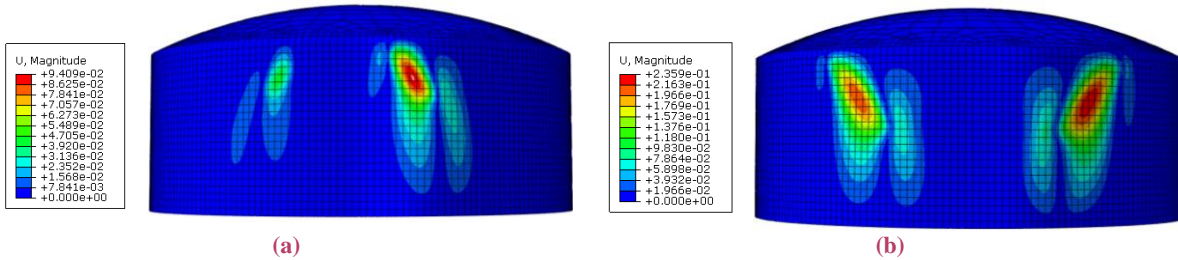


Figura 5.24: Análisis no lineal geométrico (Riks) para asentamientos medidos: (a): Sin solicitación de viento, (b): Con solicitación de viento.

Estado actual del tanque:

Las abolladuras se encuentran en la virola inferior donde hay reducción en el espesor por corrosión. Adoptan una forma vertical y no coinciden con los meridianos que sufren el descenso vertical del apoyo. En la Figura 5.25 se muestra la deformada para el estado actual del tanque con asentamientos y corrosión medida. Se ve claramente la diferencia con las deformadas obtenidas en la Figura 5.24 cuando existen solo asentamientos.

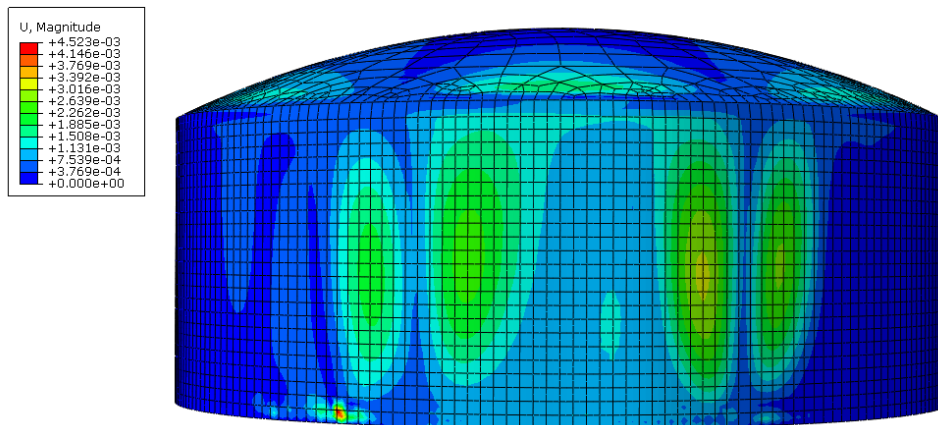


Figura 5.25: Análisis no lineal geométrico (Riks) para el estado actual del tanque bajo solicitación de viento.

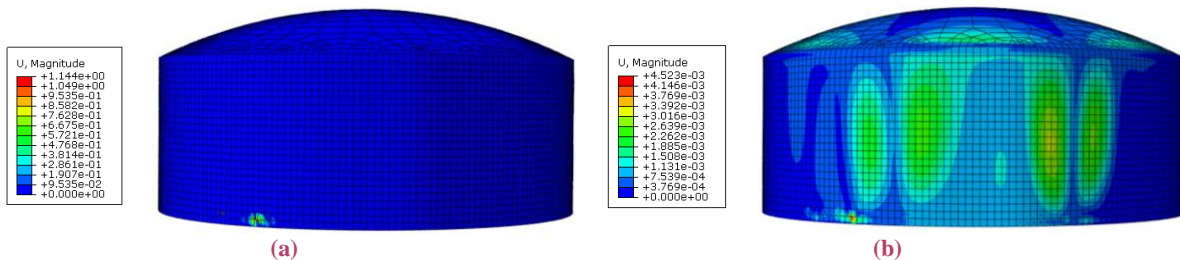
Al considerar los espesores medidos a barlovento y la mitad del asentamiento máximo, las tensiones de Von Mises son superiores a la tensión de fluencia del acero (250 MPa). Esto significa que existe un elevado grado de plastificación en la envolvente bajo estos daños por corrosión y asentamiento diferencial al estar solicitado por viento. Es probable que exista fisuración y que aparezcan derrames del producto. La Figura 5.26 muestra la existencia de petróleo derramado en la envolvente del tanque analizado:



(a) (b)
Figura 5.26: Existencia de filtraciones de petróleo en la envolvente del tanque analizado: (a): Virolas inferiores, (b): Virolas superiores.

A esto debe sumarse el estado del techo que se encuentra inaccesible incluso para fines de mantenimiento por el gran deterioro por corrosión. Se puede decir que difícilmente la estructura se encuentra en condiciones de continuar en servicio. Las tensiones máximas son coincidentes con la ubicación de las abolladuras tanto para el modelado de asentamientos de forma aislada y la combinación con corrosión medida.

Comparando los resultados obtenidos para el caso del estado actual del tanque, todas las combinaciones coinciden para el caso de asentamientos como única imperfección en la estructura. Esto sucede considerando o no la solicitación de viento. Se encuentran similitudes en el nodo, el valor del máximo desplazamiento fuera del plano y la trayectoria poscrítica. A su vez, los nodos del análisis LBA coinciden con aquellos de los cuales se estudia la trayectoria en GNLA y GNIA. Esto significa que la trayectoria de los mismos representa el comportamiento de inestabilidad del equilibrio estructural para cada escenario. En la Figura 5.27 se observan los resultados para ambos métodos y la coincidencia del nodo con el mayor desplazamiento en la virola inferior.



(a) (b)
Figura 5.27: Análisis del estado actual del tanque: (a) LBA (Buckle), (b) GNIA (Riks).

Estado futuro del tanque:

Las imperfecciones en la estructura destruyen los puntos de bifurcación y se obtienen nuevas trayectorias de equilibrio para cada amplitud de imperfección. Cuando aumenta la reducción de espesores y deformación por asentamientos diferenciales para el caso analizado se puede afirmar que las trayectorias obtenidas se desvían cada vez más del sistema perfecto. Las cargas causan pandeo aunque alcancen un valor menor que la carga crítica. Esto se ve representado en el valor del parámetro amplificador de las cargas. Si se compara el valor obtenido para el estado actual de la estructura con el estado futuro hay un corrimiento notorio del punto de bifurcación. El punto crítico ocurre para un valor λ aproximadamente un 80% menor y un descenso vertical un 90% más bajo. Esto significa que con un descenso diferencial para dicho estado de deformación la estructura ya se encuentra en el estado poscrítico. En la Figura 5.28 se observa el comportamiento de la estructura en el estado actual y futuro.

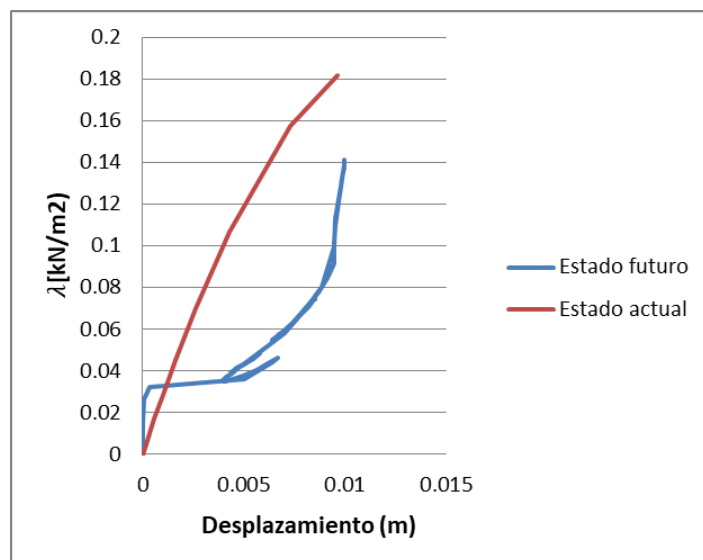


Figura 5.28: Trayectorias de equilibrio obtenidas mediante el método de Riks (Análisis GNIA) para el estado actual y futuro del tanque.

Comparaciones:

Cuando existen asentamientos diferenciales y luego se suma la sollicitación de viento, combinados o no con corrosión, coinciden los resultados de LBA, GNLA y GNIA. Esto indica que con el estado de deformación presente la inestabilidad del equilibrio ocurre previamente a la sollicitación de viento. Las cargas críticas obtenidas se encuentran asociadas a la sollicitación de asentamientos diferenciales.

En cada caso analizado la estructura presenta el comportamiento de pandeo de bifurcación. Existe una trayectoria poscrítica secundaria, el equilibrio es inestable ya que los desplazamientos aumentan indefinidamente.

Si se observan las deformadas obtenidas por otros autores al analizar un descenso puntual de la cáscara se observan simetrías en las abolladuras sobre la envolvente, como se muestra en la Figura 5.29. Es diferente de lo encontrado en el presente trabajo donde las abolladuras son asimétricas e inclinadas. Esto se debe a que el patrón de asentamientos medido sobre el tanque es asimétrico como se explica en el capítulo 3.

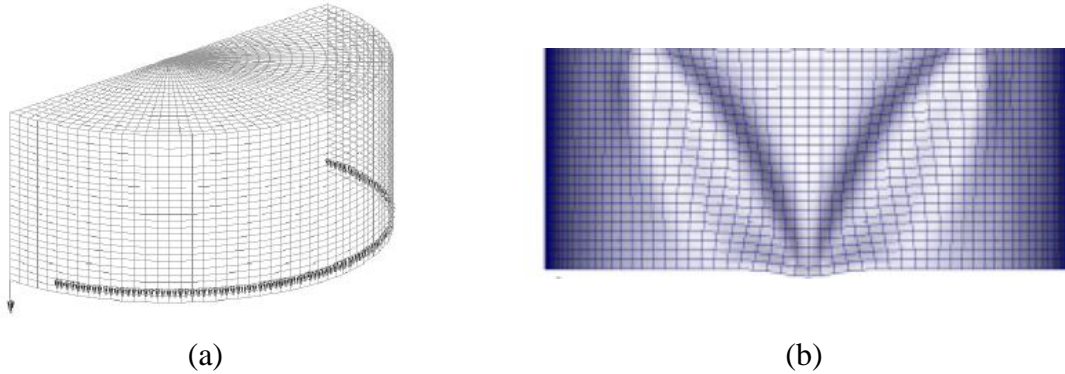


Figura 5.29: Análisis de asentamiento puntual de la envolvente: (a): Malla de elementos finitos, (b) Deformada en la envolvente.⁶

⁶ Fuente: Godoy L.A., Sosa E.M. (2002). Deflections of Thin-Walled Storage Tanks with Roof due to Localized Support Settlements, Paper, Department of Civil Engineering, University of Puerto Rico. Fig. 4; 7

CAPÍTULO 6

DETERMINACIÓN Y CATEGORIZACIÓN DEL RIESGO

6.1 CONSIDERACIONES PRINCIPALES

Se plantea una metodología de valoración del riesgo con criterios cuali cuantitativos. El criterio utilizado fija como evento iniciador la pérdida de contención del tanque debido a causas de integridad mecánica y/u operativas. A partir del mismo se analizan dos posibles escenarios: derrame de producto e incendio, cuyos valores de riesgo se calculan por separado. Intervienen 3 factores obtenidos de las matrices de Consecuencia, Exposición y Probabilidad (CEP). El *riesgo* es la posibilidad de que se sufra un daño. Se entiende como *consecuencia* la magnitud de los daños, *probabilidad* la posibilidad de que determinados factores de riesgo se materialicen en daños, y *exposición* la frecuencia de ocurrencia del factor que inicia el daño. El valor de riesgo se obtiene como producto de estos tres valores. El método se basa en la normativa API 580/581 (2016), metodología RBI (Risk Based Inspection).

6.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Valoración del riesgo

Se obtienen los valores de Consecuencia, Exposición y Probabilidad para los escenarios de derrame e incendio, se calcula el valor de riesgo según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{RIESGO (RB)} \\ = \text{EXPOSICIÓN (E)} \times \text{PROBABILIDAD (P)} \times \text{CONSECUENCIA (C)} \end{aligned} \quad (6.1)$$

El valor del cálculo se utiliza para clasificar el riesgo en las siguientes 5 categorías:

- 1) “0”: Extremo.
- 2) “1”: Urgente.
- 3) “2”: Alto.
- 4) “3”: Moderado.
- 5) “4”: Menor.

La Tabla 6.1 muestra el rango de cada categoría y acciones necesarias.

CATEGORIA DE RIESGO	RB=ExpxC	ACTUACIONES NECESARIAS
0	RB>350	Evaluar suspender la actividad si no se toman medidas para rebajar el nivel de riesgo.
1	82<RB<350	Medidas correctivas de prioridad inmediata. Evaluar, registrar e implantar las medidas de reducción. Registrar y verificar que se resuelven en tiempo y forma adecuadas.
2	32<RB<82	Medidas correctivas de prioridad alta (implementar antes de puesta en marcha con revisión previa). Evaluar, registrar e implantar siempre que sea razonablemente posible. Luego reevaluar riesgo.
3	14<RB<35	Medidas correctivas de prioridad normal (pueden implementarse luego de puesta en marcha). Todas las medidas cuyo beneficio supere su coste deben ser implementadas.
4	RB<14	Evaluar la necesidad de medidas correctivas con el objetivo de mejora continua. Se implantarán aquellas medidas que supongan baja inversión.

Tabla 6.1: Categoría de riesgo y actuaciones necesarias.

Valoración de la exposición

La exposición se valora en base a la Tabla 6.2, es una tabla de doble entrada. Verticalmente se encuentra la edad del tanque y la calidad de sus reparaciones o inspecciones, horizontalmente se mencionan daños calificados como bajos, medios o altos. Para cada uno se establece un puntaje. Se elige la combinación más desfavorable.

TABLA DE EXPOSICION	CORROSIVIDAD DEL MEDIO (CORROSION INTERNA)			CORROSION EXTERNA DEL PISO			CORROSION EXTERNA BAJO LA AISLACION			CONDICION ESTRUCTURAL (asentamientos, abolladuras, deformaciones de la envolvente, etc.)			FISURACION	
	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Daño alto	Daño bajo	No aplica	Mecanismo de daño potencial (alto nivel de vibraciones, H2S, etc)	No aplica
Tk nuevo o auditado/reparado (menos de 2 años) BUENO	0,3	0,3	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	5	0,6	0	2,5	0
Tk nuevo o auditado/reparado (menos de 2 años) REGULAR	0,6	0,6	1,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	5	0,6	0	5	0
Tk auditado/reparado entre 2 y 5 años BUENO	0,6	0,6	1,2	0,6	0,6	1,2	0,6	0,6	1,2	5	0,6	0	5	0
Tk auditado/reparado entre 2 y 5 años REGULAR	0,6	1,2	1,2	0,6	0,6	1,2	0,6	0,6	1,2	5	1,2	0	5	0
Tk auditado/reparado entre 5 y 15 años BUENO	1,2	2,5	2,5	1,2	2,5	2,5	1,2	2,5	2,5	5	1,2	0	5	0
Tk auditado/reparado entre 5 y 15 años REGULAR	1,2	2,5	5	1,2	2,5	5	1,2	2,5	5	5	1,2	0	5	0
Tk no auditado menor a 5 años de antigüedad	0,6	1,2	2,5	0,6	1,2	2,5	0,6	1,2	2,5	5	0,6	0	2,5	0
Tk no auditado antigüedad entre 5 y 10 años	1,2	2,5	5	1,2	2,5	5	1,2	2,5	5	5	1,2	0	5	0
Tk no auditado de mayor a 10 años de antigüedad	2,5	5	5	2,5	5	5	2,5	5	5	5	1,2	0	5	0

Tabla 6.2: Tabla de exposición.

Se exceptúan las dos situaciones siguientes:

- 1- Exposición para derrame: Si hay algún tipo de pérdida la exposición es igual a “10”.
- 2- Exposición para incendio: También se utiliza la Tabla 6.2.

Cuando existen pérdidas de producto en techo, envolvente o en las dos zonas, la exposición toma el valor “10” sin utilizar la tabla.

Los valores de la exposición obtenidos en la Tabla 6.2 se relacionan con la matriz de exposición mostrada en la tabla 6.3:

EXPOSICION		VALOR
Muy rara	No se espera que ocurra	0,3
Rara	Es posible que ocurra	0,6
Poco usual	Se espera que ocurra al menos una vez al mes	1,2
Ocasional	Ocurre con frecuencia anual	2,5
Frecuente	Algunas veces al año	5
Muy frecuente	Más de una vez al mes	10

Tabla 6.3: Matriz de exposición.

Valoración de la consecuencia

Las consecuencias se valorizan en base a la Tabla 6.4 donde se muestra la matriz de consecuencia, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

DERRAME: Se ingresa a cada columna y se toma el mayor valor de consecuencia obtenido.

INCENDIO: Se sigue el mismo procedimiento que para derrame, considerando que si el tanque es de agua anula la exposición llevando el riesgo a “0”.

Nuevamente de todas las combinaciones obtenidas por ser un cuadro de doble entrada se elige la más desfavorable.

	CONSECUENCIAS				VALOR
	Daños a las personas	Daños a la propiedad y costos de remediación ambiental (USD)	Medioambiente	Nivel de difusión; reputación	
Menores	Incidente sin baja	5 k - 100 k	Inidencia ambiental no relevante o en zona sin contención garantizada que provoca un daño ambiental local dentro de los límites de la propiedad	Sin difusión	1,7
Moderadas	Hasta 30 días de baja, <1% de pob. de 1 muerte	100 k - 1 M	Daño ambiental relevante que excede los niveles de referencia de calidad ambiental o que es capaz de generar una denuncia y no tiene efectos permanentes	Crisis de nivel verde	3
Serias	Más de 30 días de baja, <10% de prob. de 1 muerte	1 M - 10 M	Daño ambiental grave que puede afectar al entorno de la propiedad, que supera en amplias zonas los niveles de referencia de calidad ambiental y puede afectar a terceros	Crisis de nivel amarillo	7
Muy serias	Puede causar una muerte o lesiones permanentes	10 M - 100 M	Daño ambiental muy grave. Se requiere a la compañía medidas de corrección y/o compensación importantes, excede en amplias zonas los niveles de referencia de calidad ambiental; alta probabilidad de daño residual permanente	Crisis de nivel rojo	16
Desastrosas	Puede causar entre 2 y 9 muertes	100 M - 1000 M	Daño ambiental catastrófico; pérdidas de recursos y servicios ambientales. Daños permanentes	Afectación internacional en forma transitoria	40
Catastróficas	Puede causar 10 o más muertes	>1000 M	Daño ambiental catastrófico de gran extensión; pérdidas extensivas de recursos y servicios ambientales. Daños permanentes	Afectación internacional en forma permanente	100

Tabla 6.4: Matriz de consecuencia.

Valoración de la probabilidad

Se muestra en la Tabla 6.5 las entradas asociadas a la probabilidad para derrame y en la Tabla 6.6 las entradas asociadas a la probabilidad para incendio. Para los ítems de cada columna se indica si son adecuados, inadecuados o inexistentes y luego se realiza la sumatoria de todos los puntajes obtenidos para derrame e incendio independientes entre sí.

DERRAME				
ENTRADAS ASOCIADAS A LA PROBABILIDAD				
	Recinto de contención	Disponibilidad de sistema de detección	Disponibilidad de sistema de bloqueo	Entrenamiento adecuado de las personas que operan y mantienen la instalación
ADECUADO	10	10	10	30
INADECUADO	15	5	5	5
INEXISTENTE	0	0	0	0

Tabla 6.5: Entradas asociadas a la probabilidad para derrame.

INCENDIO						
ENTRADAS ASOCIADAS A LA PROBABILIDAD						
	Recinto de contención	Sistema contra incendio	Disponibilidad de sistema de detección	Disponibilidad de sistema de bloqueo	Entrenamiento adecuado de las personas que operan y mantienen la instalación	Seguridad eléctrica
ADECUADO	70	70	10	10	30	30
INADECUADO	35	35	5	5	5	5
INEXISTENTE	0	0	0	0	0	0

Tabla 6.6: Entradas asociadas a la probabilidad para incendio.

La Tabla 6.7 muestra la categoría del valor de la probabilidad para derrame e incendio dependiendo del escenario de evaluación. Se ingresa a la tabla con el resultado de las sumatorias de las Tablas 6.5 y 6.6.

CATEGORÍA DEL VALOR DE PROBABILIDAD					
DERRAME			INCENDIO		
RANGO		VALOR	RANGO		VALOR
Mayor o igual a	Menor a		Mayor o igual a	Menor a	
0	20	10	0	35	10
20	50	5	35	70	5
50	70	2,5	70	105	2,5
70	(≤80)	1,2	105	140	1,2
			140	175	0,6
			175	(≤220)	0,3

Tabla 6.7: Categoría del valor de la probabilidad para derrame e incendio.

La puntuación obtenida ponderando los distintos ítems define el valor de la probabilidad para cada escenario. En la Tabla 6.8 se muestra la matriz de probabilidad:

PROBABILIDAD	VALOR
Prácticamente imposible	0,3
Altamente improbable	0,6
Remotamente posible	1,2
Poco usual	2,5
Posible	5
Casi seguro	10

Tabla 6.8: Matriz de probabilidad.

6.3 CRITERIOS

Se simplifican la cantidad de combinaciones obtenidas acotándolas a las que presentan relación con el caso analizado en el presente trabajo.

Exposición

- Corrosividad del medio (Corrosión interna).
- Condición estructural.
- Fisuración.

Consecuencia

- Daños a las personas.
- Medioambiente.

No se consideran las entradas de daños a la propiedad, costos de remediación ambiental y nivel de difusión ya que requieren de análisis económico y estadístico los cuales no son objeto del presente trabajo.

Probabilidad

Se consideran todas las entradas de las tablas.

6.4 VALORACIÓN

Exposición

Como se observan manchas de petróleo en la envolvente (Figura 5.24) y el tanque se encuentra muy deformado por asentamiento diferencial y deteriorado por corrosión no aplica las Tablas 6.2 y 6.3. Directamente se define la exposición con el valor “10”, tanto para derrame como para incendio.

Consecuencia

Criterios considerados tanto para derrame como para incendio:

- Se trata de una estructura que contiene 10000 m³ de capacidad, uno de los mayores valores para los recipientes y tanques de la industria.
- Se encuentra en una Planta de Tratamiento de Crudo: la misma recibe y pone en especificación un volumen elevado de petróleo. Además, en dicha instalación se encuentran empleados en salas de control y oficinas en cercanía.

-Daños a las personas: Hasta 30 días de baja (<1% de probabilidad de 1 muerte). Existen protocolos y simulacros cada un cierto periodo de tiempo por lo cual la probabilidad de ocurrencia de muertes es baja. Se obtiene consecuencia Moderada, valor “3”.

-Medioambiente: Daño ambiental relevante que excede los niveles de referencia de calidad ambiental o que es capaz de generar una denuncia y no tiene efectos permanentes. No puede considerarse no relevante ya que contiene hidrocarburo pero tampoco afectaría a terceros. Consecuencia Moderada, valor “3”.

El valor es “3” en ambos análisis.

Probabilidad:

- Derrame:

Recinto de contención: Existe y es adecuado, puntaje=30.

Disponibilidad de sistema de detección: Hay monitoreo, por lo tanto existe y es adecuado, puntaje=10.

Disponibilidad de sistema de bloqueo: Existe y es adecuado, puntaje=10.

Entrenamiento adecuado de las personas que operan y mantienen la instalación: En la industria hay capacitaciones permanentemente por lo cual es adecuado, puntaje=30.

El puntaje total se obtiene como la sumatoria, el mismo es “80”, siendo la probabilidad 1,2 (Tabla 6.7). En la matriz de probabilidad se obtiene que es remotamente posible (Tabla 6.8).

- Incendio:

Recinto de contención: Existe y es adecuado, puntaje=70.

Sistema contra incendio: Hay anillos de refrigeración y cámaras de espuma por lo cual es adecuado, puntaje=70.

Disponibilidad de sistema de detección: Hay monitoreo, por lo tanto existe y es adecuado, puntaje=10.

Disponibilidad de sistema de bloqueo: Existe y es adecuado, puntaje=10.

Entrenamiento adecuado de las personas que operan y mantienen la instalación: En la industria hay capacitaciones permanentemente por lo cual es adecuado, puntaje=30.

Seguridad eléctrica: Existe y es adecuada, puntaje=30.

El puntaje total se obtiene como la sumatoria, el mismo es “220”, siendo la probabilidad 0,3 (Tabla 6.7). En la matriz de probabilidad se obtiene que es prácticamente imposible (Tabla 6.8).

6.5 RIESGO

Utilizando la Ecuación (6.1), se obtiene:

- Derrame:

$$RB_{derrame} = E \times P \times C = 10 * 1,2 * 3 = 36 \quad (6.2)$$

Como el valor está entre 35 y 82, por la Tabla 6.1 la categoría de riesgo es “2” (Alto) por lo cual las medidas correctivas son de prioridad alta (implementar antes de puesta en marcha con revisión previa). Se propone “*evaluar, registrar e implantar siempre que sea razonablemente posible. Luego reevaluar riesgo*” (Tabla 6.1).

- Incendio:

$$RB_{\text{incendio}} = E \times P \times C = 10 * 0,3 * 3 = 9 \quad (6.3)$$

Como el valor es menor a 14, por la Tabla 6.1 la categoría de riesgo es “4” (Menor) por lo cual se propone “*evaluar la necesidad de medidas correctivas con el objetivo de mejora continua. Se implantarán aquellas medidas que supongan baja inversión*” (Tabla 6.1).

CAPÍTULO 7

CONCLUSIÓN

7.1 SÍNTESIS

El presente proyecto integrador profesional propone realizar la evaluación del estado real de un tanque cortador de petróleo localizado en la Provincia de Santa Cruz en una planta de tratamiento de crudo operado por una empresa de la zona. Dicha estructura es un componente fundamental en la industria hidrocarburífera. El mismo se encuentra afectado por corrosión en la primera virola y asentamientos diferenciales en la base. El objetivo es analizar cómo afecta dicho estado de deformación en el comportamiento estructural.

Posteriormente a investigar sobre el tipo de tanque, los efectos asociados y evaluar los ensayos no destructivos disponibles, se realizan estudios numéricos mediante el software ABAQUS (2006) para evaluar el estado del tanque en servicio. Se plantean tres escenarios: estado inicial del tanque donde no existía deformación, estado actual y estado futuro. En un principio se analiza la estructura bajo la influencia de la corrosión y asentamientos de forma aislada y luego se combinan para obtener el resultado total en cada escenario. Se estudia el comportamiento del tanque mediante el Análisis de Bifurcación Lineal (LBA) para conocer la instancia en la cual aparecen problemas de inestabilidad del equilibrio. Posteriormente se realiza un Análisis No Lineal Geométrico (GNLA) mediante el método de Riks considerando la influencia de las imperfecciones geométricas (GNLI). Se logra obtener las trayectorias de equilibrio asociadas a los estados críticos y poscríticos, con los mayores desplazamientos fuera del plano para cada caso.

7.2 PRINCIPALES APORTES DE LA INVESTIGACIÓN

Estado inicial del tanque

- ✓ Los desplazamientos son del orden del espesor de la virola, aumentan hacia el fondo del tanque donde la presión hidrostática es mayor. La nieve genera mayor compresión en la cáscara pero la diferencia es despreciable.
- ✓ La velocidad de viento que produce inestabilidad del equilibrio es menor a la básica reglamentaria para Santa Cruz.

Influencia de la corrosión

- ✓ La disminución de espesor genera concentración de tensiones favoreciendo el aumento de la corrosión.
- ✓ Cuando el tanque se encuentra vacío bajo la sollicitación de viento es el caso más desfavorable para pandeo mientras que para el análisis tensodeformacional son las sollicitaciones de peso propio y fluido.
- ✓ Los resultados que se obtienen cuando la corrosión se encuentra solo a barlovento son más críticos que cuando abarca todo el perímetro.
- ✓ Las cargas críticas obtenidas para la velocidad de colapso son menores a la básica reglamentaria.
- ✓ Las abolladuras son elípticas y verticales y coinciden con los meridianos a barlovento.
- ✓ Las tensiones aumentan y las de Von Mises superan a la de fluencia en un orden.
- ✓ Los desplazamientos obtenidos son de un orden mayor al del espesor de la cáscara.

Influencia de los asentamientos diferenciales

- ✓ El comportamiento es no lineal. La linealidad existe al principio cuando el descenso vertical es del orden del espesor de la cáscara.
- ✓ Las abolladuras son elípticas e inclinadas probablemente por el asentamiento asimétrico. Coinciden con los meridianos asentados. Cuando actúa el viento se desplazan de los meridianos asentados.
- ✓ Los desplazamientos aumentan hacia la parte superior de la envolvente por la mayor rigidez que otorga el techo.
- ✓ Las deformadas son diferentes a lo obtenido para cargas puntuales por otros autores (Godoy, Sosa).

Estado actual del tanque

- ✓ Las abolladuras aparecen en la virola inferior con reducción de espesor. No coinciden con los meridianos asentados.
- ✓ Se obtienen los mismos resultados que cuando solo hay descenso vertical del apoyo.
- ✓ La trayectoria de los nodos representa el comportamiento de inestabilidad del equilibrio estructural.
- ✓ Las tensiones de Von Mises superan a las de fluencia por lo cual existe plastificación.
- ✓ Coincide el nodo con mayor desplazamiento para LBA y GNIA.

Estado futuro del tanque

- ✓ La presencia de imperfecciones desvía a la trayectoria del sistema perfecto y el pandeo ocurre para cargas mucho más bajas.

Comparaciones

- ✓ La estructura se encuentra en estado poscrítico con equilibrio inestable, los desplazamientos aumentan indefinidamente.
- ✓ El pandeo es de bifurcación.
- ✓ Las tensiones de Von Mises son mayores a las de fluencia por lo cual existe plastificación en la envolvente.
- ✓ La ubicación de zonas con deformaciones permanentes coincide con la de las abolladuras. Es probable que existan fisuras en dicho sector y haya peligro de derrame.
- ✓ El modo crítico ocurre para la solicitación de asentamientos previo a que actúe la carga de viento.

7.3 CAUSAS Y ACCIONES CORRECTIVAS

Las causas posibles para el gran deterioro que presenta la estructura en cuanto a reducción de espesores por corrosión asentamientos diferenciales de la base son:

- Depósito de sólidos en el fondo: el petróleo existente en la zona donde se encuentra el tanque es de densidad elevada. Esto requiere que el tanque cortador sea diseñado tipo araña y no con platos como se mencionó en el capítulo 2. Dicho diseño influye en la correcta evacuación de los sólidos mediante la purga de fondo. En un tanque diseñado con platos como el estudiado en el presente trabajo los sólidos se depositan de forma no uniforme. Esto crea un ambiente propenso al desarrollo de colonias bacterianas sólo en determinados sectores, favoreciendo el avance de la corrosión.
- Purga de fondo: diseño inadecuado cuanto a dimensiones para la gran cantidad de sólidos depositados en el fondo sumado a la necesidad de limpieza más frecuente.
- Escurrimiento de agua indebido: ocurrencia de socavaciones del terraplén por una incorrecta canalización del agua en la locación.
- Conformación inadecuada del terraplén: al momento de la construcción la compactación fue inadecuada, generando durante los años en servicio una desnivelación de la base del tanque. Cuando la estructura es de gran diámetro las posibilidades de que esté fundada sobre un suelo de características razonablemente uniformes disminuyen, generándose desplazamientos irregulares.
- Mezcla corrosiva en el interior: la presencia de sales y los químicos de la mezcla emulsiva favorecen el desarrollo de la corrosión en el interior del tanque.

- Factores climáticos: las mediciones con menor espesor sobre la envolvente se encuentran ubicadas al sudoeste. La zona a barlovento y de mayor incidencia solar se encuentra al oeste para la Provincia de Santa Cruz. La combinación de fuertes ráfagas y elevadas temperaturas favorecen a la reproducción de bacterias y descenso de espesores en la zona mencionada.
- Concentración de tensiones: una desnivelación en la base del tanque ocasiona un aumento localizado de tensiones o un cambio en las condiciones de drenaje. Esto a su vez acelera la corrosión en dichos sectores.
- Techo fijo: impide el desplazamiento radial de las paredes en la parte superior por lo que un asentamiento en la base produce tensiones en las zonas cercanas al techo que hacen pandear la envolvente causando abolladuras en la misma.
- Presencia de imperfecciones en la geometría: cuando el tanque continúa solicitado al presentar deformaciones en la envolvente ocurre el pandeo de la cáscara para valores menores a la carga crítica.
- Procesos de limpieza: cuando se retira al tanque de su funcionamiento permaneciendo el mismo sin fluido en su interior aumenta su deterioro ya que dicho estado es el más desfavorable para la estructura.
- Inspecciones: muchas veces no se respetan los periodos establecidos en API 653 (2013) y no se tiene el seguimiento adecuado del estado de deformación e imperfecciones de la estructura.

Considerando los resultados del análisis de riesgo realizado en el Capítulo 6 en cuanto a la ocurrencia de derrame e incendio por el estado del tanque, es necesario proponer y evaluar las acciones correctivas con el objetivo de la mejora continua. Además, el riesgo de derrame obtenido es alto por lo cual el tanque no debería continuar su servicio sin implementar las medidas propuestas y reevaluar el riesgo previamente.

Se considera el escenario existente de la combinación de asentamientos y corrosión para las propuestas de acciones correctivas. Como se estudió en el capítulo 5, el tanque presenta elevadas deformaciones no solamente en la primera virola (la más afectada por corrosión) sino además en las virolas superiores en el sector a barlovento por la influencia del descenso vertical. Para un bajo porcentaje del asentamiento medido en los análisis realizados, la cáscara presenta un comportamiento no lineal con un elevado desplazamiento fuera del plano. Además, los ensayos de inspección externa mostraron que existe un gran deterioro del techo de cerramiento. Por ello no sería suficiente reconstruir parcialmente el tanque ya que es probable que en el corto plazo ocurra el colapso de la estructura ocasionando pérdidas económicas, ambientales y sociales elevadas. Se propone como medida la reconstrucción total del tanque. Esto incluye:

- ✓ Reconstrucción del terraplén con la compactación adecuada.

- ✓ Rediseño de las protecciones: recubrimientos anticorrosivos, inyección de químicos, protección catódica.
- ✓ Estudiar el diseño de la purga de fondo para la correcta evacuación de sólidos.

Es fundamental realizar las inspecciones periódicamente como se establece en API 650 (2013) o con frecuencia menor de acuerdo a las consideraciones de los ingenieros de integridad. Esto evita el futuro deterioro de la estructura y la necesidad de su reconstrucción total.

7.4 FUTURAS INVESTIGACIONES

Se establece la necesidad de realizar nuevos ensayos estudiando la influencia de las imperfecciones mencionadas en distinta tipología de tanques. Se propone analizar variaciones en el diámetro, altura, existencia de otro tipo de techo o la no presencia del mismo. Además, investigar la ocurrencia de la extensión del asentamiento en el perímetro. Así se podría concluir acerca de si nuevamente el estado más desfavorable para la estructura es la coincidencia del descenso con los meridianos a barlovento en superposición con corrosión.

7.5 SOSTENIBILIDAD Y RESPONSABILIDAD SOCIAL

En esta instancia del presente trabajo es muy importante remarcar que las decisiones a tomar posterior al análisis realizado, son de suma relevancia en cuanto a las consecuencias existentes en el colapso de un tanque cortador o componentes similares en la industria hidrocarburífera. Las mismas son:

- Daños a las personas y a la propiedad,
- Pérdidas de producción neta,
- Costos de remediación ambiental,
- Afectación medioambiental,
- Pérdidas de reputación de la empresa en cuestión.

Los profesionales a cargo de la toma de decisiones acerca de la integridad de la estructura y su continuidad en servicio deben concientizarse en la responsabilidad social y medioambiental que asumen. Muchas veces las opciones que prevalecen como solución se basan en los costos económicos pretendidos. Es fundamental comprender que otras cuestiones (como las mencionadas anteriormente) si ocurren en una instancia posterior por no haber actuado siguiendo otros criterios, pueden llegar a tener aún mayores costos económicos que inicialmente.

Las inspecciones que se realizan en una estructura son las instancias críticas para determinar la vida útil de la misma y las restauraciones a llevar a cabo. En dichas situaciones el criterio para la toma de decisiones debe considerar todos los factores

necesarios para mantener la seguridad en el ámbito ingenieril y ser sostenibles a lo largo del tiempo.

El concepto “Sostenible” debe existir en todos los ámbitos de la industria y para ello deben existir las relaciones entre otros 3 conceptos fundamentales: Ecológico-Social-Económico. Solamente en la intersección de los mismos existe la sostenibilidad como se muestra en la Figura 7.1. Esto debe ser el resultado de los criterios adoptados en la industria cuando se llevan a cabo los proyectos y el análisis de los mismos.



Figura 7.1: Los 3 pilares de la sostenibilidad.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO M 145-91 (2017), Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, DC, USA.

ABAQUS User's Manuals (2006), Version 6.3, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. Rhode Island.

API 650 (2013). Welded Tanks for Oil Storage, API Standard 650. American Petroleum Institute. Washington, DC, USA.

API 651 (1997). Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks, API Recommended Practice 651. American Petroleum Institute. Washington, DC, USA.

API 653 (2013). Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction, API Standard 653. American Petroleum Institute, Washington, DC, USA.

API 681 (2008). Risk-Based Inspection Technology, API Standard 681. American Petroleum Institute, Washington, DC, USA.

Arnold K. y Stewart M. (2008), Surface production operations, Elsevier Inc, Oxford, USA.

CIRSOC 101 (2005), Reglamento argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires.

CIRSOC 102 (2005), Reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires.

CIRSOC 103 (2018), Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes: Parte I Construcciones en general, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires.

CIRSOC 104 (2018), Reglamento argentino de acción de la nieve y el hielo para las construcciones, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires.

Dorta (2018), Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de un fluido de alta temperatura. Universidad politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales.

Galvele J. R. y G. S. Duffó (2006). Degradación de materiales – I Corrosión, Instituto Sabato, Buenos Aires, Argentina.

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

Godoy y Mendez-Degró (2000). Introduction to Aboveground Steel tanks, Publicación interna Universidad Nacional de Córdoba.

González, Desdín, Ricardo, Freeman (2017), Monitoreo geodésico de los asentamientos en tanques verticales de almacenamiento de combustible. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Cuba. *Minería y Geología*, 33: 266-278.

Hornung, U., and Saal, H. (2002), Buckling loads of tank shells with imperfections. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37: 605-621.

Jaca, Burgos y Godoy (2013), Evaluación de fallas de tanques horizontales de almacenamiento de fluidos, *Mecánica Computacional*, 32: 3463-3487, 2013.

Manning F. S. y Thompson R.E. (1995), Oilfield processing, Vol 2. PennWell books. Tulsa, Oklahoma.

NACE RP0183 (2001), External Cathodic Protection of On-Grade Carbon Steel Storage Tank Bottoms, Standard Recommended Practice. NACE International, Houston, Texas.

NACE SP0388 (2014), Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Carbon Steel Water Storage Tanks, Standard Recommended Practice. NACE International, Houston, Texas.

Res. SE 785 (2005), Reglamento del programa nacional de control de pérdidas de TAAHS aéreos de almacenamiento de hidrocarburos y sus derivados. Secretaría de Energía de la Nación, Buenos Aires, Argentina.

Speight J. G. (2002), Handbook of petroleum Surface analysis. John Wiley & Sons, New Jersey, Usa.