

Tabla de contenido

Resumen	i
Agradecimientos	iii
Tabla de contenido	iv
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	vii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes generales y motivación	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 General	3
1.2.2 Específicos.....	3
1.3 Alcances	3
2. Antecedentes y estado del arte	4
2.1 Estanques de almacenamiento	4
2.1.1 Estanques de techo fijo	4
2.1.2 Estanques de techo flotante externo.....	5
2.1.3 Estanques de techo flotante interno	6
2.1.4 Estanques de domo y techo flotante externo	6
2.1.5 Estanques horizontales	6
2.1.6 Estanques presurizados	7
2.1.7 Estanques de almacenamiento de gas natural licuado (GNL)	7
2.2 Defectología en estructuras de pared delgada	9
2.2.1 Criterio basado en la relación entre el defecto y el proceso de carga	9
2.2.2 Criterio basado en la distribución espacial de los defectos	9
2.2.3 Criterio basado en los parámetros afectados	10
2.3 Defectología y mecanismos de daño según API 579	12
2.4 Defectos geométricos en estanques verticales	14
2.5 Modelación de defectos geométricos	17
2.6 Esfuerzos en estructuras de pared delgada	21
2.7 Análisis de esfuerzos en estructuras imperfectas	26
2.7.1 Método de cargas equivalentes.....	27
2.7.2 Método de perturbación [1]	31
2.7.3 Método directo.....	32
2.8 Comportamiento plástico de materiales	35
2.9 Fallas estructurales en estanques verticales	37
2.10 Metodología FFS según API 579	42
2.11 Análisis FFS para defectos geométricos localizados según API 579	46
2.11.1 Método de análisis elasto-plástico	47
2.11.2 Protección contra el colapso plástico local.....	49
2.11.3 Protección contra el colapso por pandeo.....	49
3. Estudio del caso base	51
3.1 Introducción	51
3.2 Descripción del estanque	51
3.2.1 Códigos y documentos aplicados en el diseño del estanque	51

3.2.2	Características geométricas	52
3.2.3	Materiales constructivos.....	52
3.3	Cargas de diseño	52
3.4	Resumen de la inspección del estanque.....	54
3.5	Caracterización de defectos.....	56
4.	Metodología.....	57
4.1	Metodología general	57
4.1.1	Estudiar la tipología y defectología de estanques verticales de uso habitual en Chile	57
4.1.2	Preparar y adaptar una rutina para el análisis de integridad estructural (AIE) basada en el API 579.....	58
4.1.3	Analizar casos representativos aplicando la rutina para AIE	58
4.1.4	Categorizar los resultados según la IE de los estanques verticales analizados ..	58
4.2	Parametrización de defectos.....	59
4.3	Modelación geométrica del estanque	61
4.3.1	Modelación en Inventor	61
4.3.2	Modelación en Design Modeler.....	61
4.4	Modelación geométrica de los defectos	64
4.5	Restricciones y solicitaciones del estanque.....	67
4.6	Selección de malla	69
4.7	AEF de los modelos.....	70
5.	Resultados y discusión	71
5.1	Modelación geométrica.....	71
5.1.1	Caso base	71
5.1.2	Defectos parametrizados	72
5.2	Selección de malla	75
5.3	AEF	76
5.3.1	Caso Base	76
5.3.2	Defectos parametrizados	84
5.4	Trabajo futuro	95
6.	Conclusiones	96
	Bibliografía.....	99

Índice de tablas

Tabla 2.1: Cuadro comparativo de los métodos de modelación analizados.....	20
Tabla 2.2: Lista de algunos elementos utilizados para MEF [27].	33
Tabla 2.3: Resumen de las tolerancias de fabricación del API 650 [5].	46
Tabla 2.4: Combinaciones de cargas para el análisis elasto-plástico [5].	48
Tabla 4.1: Listado de vigas de la estructura del techo.	62
Tabla 4.2: Codificación de resultados.	70
Tabla 5.1: Dimensiones generales de los defectos del caso base.	71
Tabla 5.2: Parametrización de los defectos del caso base.	72
Tabla 5.3: Dimensiones generales de los defectos arbitrarios.....	72
Tabla 5.4: Parametrización de los defectos arbitrarios.	73
Tabla 5.5: Listado de mallas analizadas.	75
Tabla 5.6: Resultados del análisis contra el colapso plástico global.	77
Tabla 5.7: Resultados del estanque base para la combinación de cargas n°1.	80
Tabla 5.8: Resultados del estanque base para la combinación de cargas n°2.	80
Tabla 5.9: Resultados del estanque base para la combinación de cargas n°3.	80
Tabla 5.10: Resultados del estanque base para la combinación de cargas n°4.	81
Tabla 5.11: Resultados del estanque base para la combinación de cargas n°5.	81
Tabla 5.12: Resultados del análisis contra el colapso plástico local para el defecto N°1 para la combinación de cargas n°6.	82
Tabla 5.13: Resultados los defectos arbitrarios para la combinación de cargas n°1.	88

Índice de figuras

Figura 2.1: Esquema de un estanque vertical de techo fijo con sus componentes principales (PL: Plancha).....	5
Figura 2.2: Esquema de un estanque vertical de techo flotante externo [11].....	5
Figura 2.3: Esquema de un estanque vertical de techo flotante interno [11].	6
Figura 2.4: Esquema de un estanque vertical de techo flotante externo [12].....	6
Figura 2.5: Esquema de un estanque horizontal [13].....	7
Figura 2.6: Esquema de un estanque presurizado [14].	7
Figura 2.7: Esquema de un estanque de almacenamiento de GNL [15].	8
Figura 2.8: Área de la estructura afectada por (a) defecto con propiedades prismáticas; (b) defectos con patrón repetido; (c) defecto localizado; y (d) defecto globalizado [1].	10
Figura 2.9: Esquema de una abolladura. Donde ddp corresponde a la profundidad del defecto, rd es el radio de curvatura del defecto y tc es el espesor de cáscara [5].	15
Figura 2.10: Estanque de almacenamiento de hidrocarburos que presenta un defecto plano de alrededor de 3x3 m ² en los anillos superiores. (Fotografía tomada por GIE S.A., 2011 [17])	15
Figura 2.11: Abolladura en estanque vertical producida por vacío (Fotografía extraída desde el sitio de Walt Beattie [18]).	16
Figura 2.12: Modelo de los defectos, donde t es el espesor de la cáscara, r corresponde al radio de la circunferencia afectada por el defecto y f es la profundidad del defecto [15].	17
Figura 2.13: Modelamiento y notación de una estructura axisimétrica con defectos [1].	18
Figura 2.14: Modelo axisimétrico de una tubería de descarga indentada por una superficie rígida [20].	19
Figura 2.15: Esquema de fuerzas de membrana, momentos flectores y presiones de la cáscara cilíndrica [23].	23
Figura 2.16: Esquema de cilindro alargado sometido al momento flector M₀ [24].	27
Figura 2.17: Esquema del método de cargas equivalentes para el análisis de un cilindro imperfecto bajo presión interna [22].	28
Figura 2.18: Curva esfuerzo-deformación del acero A36.	36
Figura 2.19: Pandeo global en estanque vertical (29)[32].	37
Figura 2.20: Pandeo local en estanque [33].	38
Figura 2.21: Pandeo global tipo pata de elefante [34].	39
Figura 2.22: Esquema de la trayectoria de equilibrio para: cilindro de pared delgada perfecto (línea continua), y cilindro imperfecto (línea discontinua) [36].	40
Figura 2.23: Aumento de factor de carga (LF) debido a la razón de amplitud del defecto α/L para domos de pared delgada. Donde LFO es el factor de carga de la estructura perfecta, α es la amplitud del defecto y L la longitud de la celda del domo [35].	41
Figura 3.1: Vista de elevación del estanque vertical TK-002.	51
Figura 4.1: Diagrama de la metodología.	57
Figura 4.2: Modelo del manto y fondo del estanque.	61
Figura 4.3: Extracto de plano del techo. Vista superior.	62
Figura 4.4: Extracto de plano del techo. Vista de corte en elevación.	62
Figura 4.5: Boceto del techo en ANSYS.	63
Figura 4.6: Estructura de techo del estanque.	63
Figura 4.7: Modelo terminado del estanque.	64

Figura 4.8: Vista isométrica del manto con los puntos importados (en verde) delimitados por bocetos en el manto.....	65
Figura 4.9: Boceto del perfil del defecto donde el perfil del boceto se representa con una línea azul continua; los puntos de interpolación se muestran con sus grados de libertad en rojo; y los puntos exportados se representan en verde.	66
Figura 4.10: Izquierda: Bocetos del perfil parametrizado. Derecha: Detalle del boceto horizontal.	66
Figura 4.11: Restricciones y cargas aplicadas a los modelos.	68
Figura 5.1: Identificación de defectos del caso del estanque base.	71
Figura 5.2: Estanque con diferentes defectos (área verde). Los defectos poseen distinta relación de aspecto. Primera fila, RA= 1:1; Segunda fila, RA=3:1 y 2:1; Tercera fila, RA=1:2 y 1:3.	74
Figura 5.3: Mallas evaluadas. De izquierda a derecha: Mallado por default (2); mallado con cuadriláteros automático (3); y mallado con cuadriláteros por zonas (5). Los números indican la correspondencia con la Tabla 5.5.	75
Figura 5.4: Inestabilidad presentada para las combinaciones de carga n°1-4.	77
Figura 5.5: Izquierda: Esfuerzo equivalente, y derecha: deformación plástica equivalente al momento de la falla para la combinación de cargas n°1. Etiquetas: Esfuerzo equivalente máximo para cada defecto.	78
Figura 5.6: Izquierda: Esfuerzo equivalente, y derecha: deformación plástica equivalente al momento de la falla para la combinación de cargas n°2.	78
Figura 5.7: Izquierda: Esfuerzo equivalente, y derecha: deformación plástica equivalente al momento de la falla para la combinación de cargas n°3.	79
Figura 5.8: Izquierda: Esfuerzo equivalente, y derecha: deformación plástica equivalente al momento de la falla para la combinación de cargas n°4.	79
Figura 5.9: Izquierda: Esfuerzo equivalente, y derecha: deformación plástica equivalente al momento de la falla para la combinación de cargas n°5.	80
Figura 5.10: Izquierda: Esfuerzo equivalente, y derecha: deformación plástica equivalente al momento de la falla para la combinación de cargas n°6.	82
Figura 5.11: Esfuerzo equivalente para defectos de RA = 1: 1 . De izquierda a derecha: $\epsilon = 30\text{ mm}; 90\text{ mm}; \text{ y } 150\text{ mm}$	84
Figura 5.12: Esfuerzo equivalente para defectos de RA = 2: 2 . De izquierda a derecha: $\epsilon = 30\text{ mm}; 90\text{ mm}; \text{ y } 150\text{ mm}$	85
Figura 5.13: Esfuerzo equivalente para defectos de RA = 3: 3 . De izquierda a derecha: $\epsilon = 30\text{ mm y } 150\text{ mm}$	85
Figura 5.14: Esfuerzo equivalente para defectos de RA = 1: 2 . De izquierda a derecha: $\epsilon = 30\text{ mm y } 150\text{ mm}$	86
Figura 5.15: Esfuerzo equivalente para defectos de RA = 1: 3 . De izquierda a derecha: $\epsilon = 30\text{ mm y } 150\text{ mm}$	86
Figura 5.16: Esfuerzo equivalente para defectos de RA = 2: 1 . De izquierda a derecha: $\epsilon = 30\text{ mm}; 90\text{ mm}; \text{ y } 150\text{ mm}$	87
Figura 5.17: Esfuerzo equivalente para defectos de RA = 3: 1 . De izquierda a derecha: $\epsilon = 30\text{ mm}; \text{ y } 150\text{ mm}$	87
Figura 5.18: Gráfico de factor de reducción de cargas vs razón de profundidad.	89
Figura 5.19: Gráfico de reducción de cargas vs masividad del defecto.	90
Figura 5.20: Gráfico de deformación plástica equivalente vs razón de profundidad.	91

Figura 5.21: Gráfico de factor de deformación plástica equivalente vs masividad del defecto....	91
Figura 5.22: Gráfico de factor de concentración de esfuerzos vs razón de profundidad.....	92
Figura 5.23: Gráfico de factor de concentración de esfuerzos vs masividad del defecto.	93
Figura 5.24: Acercamiento del análisis del esfuerzo equivalente para el defecto N°4 para la combinación de cargas n°1.....	94
Figura 5.25: Acercamiento del análisis del esfuerzo equivalente para el defecto N°1 para la combinación de cargas n°1.....	94