

# INDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Antecedentes y motivación.....	2
1.2    Descripción del problema .....	2
1.3    Solución propuesta.....	3
1.4    Objetivo general.....	4
1.5    Objetivos específicos .....	4
1.6    Alcances del proyecto.....	4
1.7    Metodologías y herramientas utilizadas.....	5
1.8    Resultados esperados .....	5
1.9    Organización de la memoria .....	6
1.9.1    Capítulo 1: Introducción.....	6
1.9.2    Capítulo 2: Marco teórico.....	6
1.9.3    Capítulo 3: Metodología de trabajo .....	6
1.9.4    Capítulo 4: Resultados obtenidos .....	6
1.9.5    Capítulo 5: Análisis de resultados .....	6
1.9.6    Capítulo 6: Conclusiones.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1    Descripción básica .....	8
2.2    Materiales empleados para la construcción de los silos.....	8
2.3    Partes fundamentales de un silo.....	9
2.3.1    Aro central de carga.....	9
2.3.2    Boca de visita .....	10
2.3.3    Láminas de paredes laterales .....	10
2.3.4    Escaleras y compuerta lateral de acceso.....	11

2.3.5	Anillo tensor .....	11
2.3.6	Anillo tubular de trabajo.....	11
2.3.7	Vigas de soporte de techo.....	12
2.3.8	Escotillas de ventilación .....	12
2.3.9	Refuerzos de anclaje.....	13
2.4	Análisis de las condiciones críticas de trabajo.....	13
2.5	Normas asociadas .....	13
2.5.1	NCh3171.Of2010: Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de cargas.....	14
2.5.2	NCh2369.Of2003: Diseño sísmico de estructura e instalaciones industriales	14
2.5.3	NCh432.Of2010: Cargas por viento sobre construcciones .....	15
2.6	Criterios generales para el análisis.....	15
2.6.1	Presión ejercida por el material a la estructura.....	16
2.7	Análisis de fuerzas sísmicas .....	19
2.7.1	Requerimientos generales.....	19
2.7.2	Masa sísmica a considerar .....	19
2.7.3	Formas de especificar la acción sísmica.....	20
2.7.4	Clasificación de estructuras y equipos según su importancia.....	20
2.7.5	Métodos de análisis .....	20
2.7.6	Análisis a través de métodos lineales .....	20
2.7.7	Análisis elástico - estático .....	21
2.7.8	Disposiciones para estanques verticales apoyados en el suelo.....	23
2.8	Análisis de las cargas ejercidas por el viento.....	23
2.8.1	Requerimientos generales.....	23
2.8.2	Procedimiento de cálculo.....	24

2.9	Análisis modal .....	30
2.9.1	Método de excitación.....	31
2.9.2	Análisis mediante elementos finitos (FEM) .....	31
2.10	Análisis por el método de elementos finitos .....	32
2.10.1	Base matemática del método .....	33
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO .....		37
3.1	Características del silo a analizar.....	38
3.2	CÁlculo de cargas ejercidas por el material almacenado .....	38
3.3	CÁlculo de cargas ejercidas por el viento .....	39
3.4	CÁlculo de carga sísmica .....	39
3.5	SIMPLIFICACIONES AL MODELO ESTRUCTURAL.....	39
3.5.1	Primer modelo simplificado .....	39
3.5.2	Segundo modelo simplificado .....	41
3.5.3	Tercer modelo simplificado.....	42
3.6	Análisis modal (obtención de frecuencias naturales de vibración).....	43
3.7	Simulación estática estructural .....	44
3.7.1	Representación de la carga ejercida por el material .....	44
3.7.2	Representación de las presiones ejercidas por el viento.....	45
3.7.3	Representación de cargas sísmicas.....	47
CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS .....		51
4.1	CÁlculo de cargas ejercidas sobre la estructura .....	52
4.1.1	Presión ejercida por el material .....	52
4.1.2	Fuerzas ejercidas por el viento .....	52
4.1.3	Análisis modal (obtención de frecuencias naturales de vibración) .....	56
4.1.4	Carga sísmica ejercida .....	58

4.2	Simulación estática estructural .....	60
4.2.1	Geometría utilizada.....	60
4.2.2	Material empleado .....	60
4.2.3	Mallado.....	61
4.2.4	Condiciones de borde .....	62
4.2.5	Resultados obtenidos .....	66
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		71
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....		76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		79
ANEXOS .....		81

## **INDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1: Ubicación del aro central de carga (fuente: AGROMETAL). .....	9
Ilustración 2: Ubicación de la boca de visita (fuente: AGROMETAL). .....	10
Ilustración 3: Ensamblaje de las láminas laterales (fuente: AGROMETAL). .....	10
Ilustración 4: Ubicación del anillo tensor (fuente: AGROMETAL). .....	11
Ilustración 5: Ubicación del anillo de trabajo (fuente: AGROMETAL). .....	12
Ilustración 6: Ubicación de las vigas de soporte de techo (fuente: AGROMETAL). .....	12
Ilustración 7: Refuerzos de anclaje (fuente: AGROMETAL). .....	13
Ilustración 8: Modelo de Janssen (fuente: EPISTEMUS). .....	16
Ilustración 9: Presión ejercida por material granular (columnas altas) (fuente: EPISTEMUS). .....	18
Ilustración 10: Presión ejercida por material granular (columnas pequeñas). .....	19
Ilustración 11: Presiones simplificadas para SPRFV (fuente: INN Chile). .....	25
Ilustración 12: Cargas de viento en estructura de techo triangular piramidal (fuente: INN Chile). .....	30
Ilustración 13: Gráfico fuerza ejercida vs tiempo (excitación estática) (fuente: Biblioteca Universidad de Sevilla, España). .....	31
Ilustración 14: Subdivisión de objeto en elementos más pequeños (fuente: iberisa.com). ..	33

Ilustración 15: Coordenadas y dirección de desplazamientos de los nodos (fuente: Frías E. (2004). Aportaciones al estudio de máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de elementos finitos. (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). España).....	34
Ilustración 16: Primer modelo estructural (fuente: propia).....	40
Ilustración 17: Forma de unión entre placas laterales (fuente: propia).....	40
Ilustración 18: Problema de contactos entre pared con refuerzo vertical (fuente: propia)...	41
Ilustración 19: Simplificación de placas laterales (fuente: propia).....	42
Ilustración 20: Simplificación de unión de placas laterales (zona basal) (fuente: propia)...	42
Ilustración 21: Carga aplicada normal a superficie cilíndrica (vista superior) (fuente: propia).....	45
Ilustración 22: Cargas de viento aplicadas sobre proyección frontal (vista superior) (fuente: propia).....	46
Ilustración 23: Flujo de aire a través de un cuerpo cilíndrico (fuente: monografias.com)...	46
Ilustración 24: Distribución de cargas de viento aplicado al modelo estructural (fuente: propia).....	47
Ilustración 25: Representación de aplicación de cargas sísmicas a edificios (fuente: Arango, S. Paz, A. Del Pilar Duque, M. Methodological Proposal For The Evaluation Of The Structural Behavior Of A Metallic Rack. Revista EIA. 2009).....	47
Ilustración 26: Representación de fuerza sísmica distribuida (fuente: propia).....	48
Ilustración 27: Representación de fuerza sísmica resultante (fuente: propia).....	48
Ilustración 28: Efecto de aplicación de carga sísmica a estructura cilíndrica (vista superior) (fuente: propia).....	48
Ilustración 29: Distribución equitativa de fuerza sísmica resultante ( $Fr$ ) a estructura cilíndrica (vista superior) (fuente: propia).....	49
Ilustración 30: DCL de la condición crítica a analizar (fuente: propia).....	50
Ilustración 31: Gráfico profundidad vs presión (fuente: propia).....	52
Ilustración 32: Condiciones aplicadas a la estructura para el análisis modal (fuente: propia).....	56
Ilustración 33: Selección de modos de vibrar (fuente: propia).....	56
Ilustración 34: Modo de vibrar N°1 (fuente propia).....	57

Ilustración 35: Modo de vibrar N°10 (fuente: propia).....	57
Ilustración 36: Modelo utilizado (fuente: propia).....	60
Ilustración 37: Ingreso de características del material del silo (fuente: propia).....	60
Ilustración 38: Mallado de la estructura (zona de unión entre manto y techo) (fuente: propia).....	61
Ilustración 39: Mallado de la estructura (zona superior techo) (fuente: propia). ....	61
Ilustración 40: Aplicación de soporte fijo a la base del silo (fuente: propia). ....	62
Ilustración 41: Aplicación de fuerza de gravedad (fuente: propia). ....	63
Ilustración 42: Ingreso de fuerza de gravedad por componentes (fuente: propia). ....	63
Ilustración 43: Aplicación de presión ejercida por el material (fuente: propia).....	63
Ilustración 44: Ingreso de presión distribuida como tabla de datos (fuente: propia). ....	64
Ilustración 45: Cargas de viento sobre muros (fuente: propia). ....	64
Ilustración 46: Cargas de viento sobre techo (fuente: propia).....	65
Ilustración 47: Ingreso carga de viento sobre muro (barlovento) (fuente: propia).....	65
Ilustración 48: Aplicación de carga sísmica (fuente: propia). ....	66
Ilustración 49: Ingreso de carga sísmica (fuente: propia).....	66
Ilustración 50: Estructura deformada (escala ampliada) (fuente: propia). ....	69
Ilustración 51: Ubicación esfuerzo equivalente de Von Mises (caso N°3) (fuente: propia).69	
Ilustración 52: Desplazamiento máximo (caso N°3) (fuente: propia).....	70
Ilustración 53: Vista superior del desplazamiento máximo (fuente: propia).....	70

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos generales silo SBH2215 (fuente: SYMAGA S.A).....	38
Tabla 2: Datos generales del material base del silo (fuente: METINVEST). ....	38
Tabla 3: Características generales del material a almacenar (fuente: OLESA S.A). ....	38
Tabla 4: Factor topográfico y de importancia obtenido (fuente: INN Chile).....	53
Tabla 5: Coeficiente de distribución de velocidades obtenido (fuente: INN Chile). ....	53
Tabla 6: Datos para obtención del factor de ráfaga (fuente: INN Chile). ....	54
Tabla 7: Datos para la obtención de la distribución de velocidades (fuente: INN Chile). ...	54
Tabla 8: Coeficiente de presión externa obtenido para muros (fuente: INN Chile).....	55
Tabla 9: Coeficiente de presión externa obtenido para techos (fuente: INN Chile).....	55

Tabla 10: Cargas de viento obtenidas (fuente: propia).....	55
Tabla 11: Aceleración efectiva y parámetros relativos al suelo (fuente: INN Chile).....	58
Tabla 12: Razón de amortiguamiento y factor de modificación de respuesta obtenido (fuente: INN Chile).....	58
Tabla 13: Periodo de vibración obtenido (fuente: propia).....	59
Tabla 14: Coeficientes sísmicos obtenidos (fuente: INN Chile). ....	59
Tabla 15: Peso de la estructura y masa sísmica (fuente: propia).....	59
Tabla 16: Esfuerzo de corte basal obtenido (fuente: propia).....	60
Tabla 17: Resultados obtenidos en simulación N°1 (fuente: propia). ....	67
Tabla 18: Resultados obtenidos en simulación N°2 (fuente: propia). ....	68
Tabla 19: Resultados obtenidos en simulación N°3 (fuente: propia). ....	68
Tabla 20: Factor de seguridad caso N°3 (fuente: propia).....	72