



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**RECOMENDACIONES DE USO PARA ESTANQUES
DE ACERO INOXIDABLE EN LA INDUSTRIA VITIVINICOLA
Y GENERACION DE MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EDUARDO PATRICIO ERNESTO GARCÉS LAVADO

**PROFESOR GUIA:
RICARDO HERRERA MARDONES**

**INTEGRANTES COMISIÓN EVALUADORA:
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES
RAMÓN MONTECINOS CONCHA**

**SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2012**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL ESTRUCTURAL
POR: EDUARDO GARCÉS LAVADO
FECHA: 09/03/2012
PROF. GUIA: Sr. RICARDO HERRERA
MARDONES

El terremoto del 27 de febrero de 2010 causó grandes daños en vivienda, infraestructura y servicios. En particular, las regiones del Bío Bío, del Maule y del Libertador Bernardo O'Higgins sufrieron daños severos en infraestructura económica agrícola, principalmente por la infraestructura vitivinícola destruida.

Es en este contexto que los consorcios del vino deciden realizar un estudio a un grupo extenso de viñas, con el fin de determinar los daños, fallas y también buenos comportamientos de los elementos de almacenaje en bodegas. A partir de este estudio, se elaboró un manual que recoge los daños y fallas observados en terreno, y que indica recomendaciones para mejorar el comportamiento ante sismos futuros.

Este trabajo de título tiene como objetivo identificar los daños y fallas en estanques de acero inoxidable de la industria vitivinícola causados por el terremoto del 27 de febrero de 2010 y proponer mejoras en los procesos de diseño, fabricación, instalación y manejo de estanques de acero. Para esto, se realizaron visitas a viñas afectadas por el terremoto para recoger información de los diversos comportamientos, se procesaron los registros y se preparó un manual con recomendaciones dirigido a las viñas del territorio nacional.

Finalmente se realizó un análisis lineal con el fin de establecer una correlación entre el comportamiento en un grupo de estanques y los esfuerzos generados en ellos a partir del sismo. Los resultados obtenidos muestran la alta sobre sollicitación y dan luces sobre las causas de los grandes daños observados.

Ante los antecedentes recogidos y los resultados obtenidos se tiene como gran recomendación global la generalización del uso de las normativas vigentes para el diseño de los estanques, desde fundación a techo, manteniendo un control adecuado sobre cada paso del diseño, dejando éste a cargo de expertos, evitando los diseños artesanales.

Índice General

| | |
|--|----|
| Índice de Figuras..... | 3 |
| Índice de Tablas..... | 5 |
| Capítulo 1 INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO..... | 7 |
| 1.1 Introducción..... | 7 |
| 1.2 Objetivos. | 8 |
| 1.3 Metodología. | 8 |
| Capítulo 2 ANTECEDENTES..... | 13 |
| 2.1 Terremoto 27 Febrero 2010 | 13 |
| 2.1.1 Parámetros Hipocentrales | 13 |
| 2.1.2 Daños en Industria del Vino..... | 14 |
| 2.2 Antecedentes Generales..... | 14 |
| 2.3 Industria Vitivinícola | 15 |
| 2.4 Descripción de Estanques y Criterios de Selección | 17 |
| 2.5 Modelo de Housner | 18 |
| 2.5.1 Masa Impulsiva..... | 18 |
| 2.5.2 Masa Convectiva | 20 |
| 2.6 Revisión normas API650 y NCh2369..... | 24 |
| 2.6.1 API Std 650 Welded Tanks for Oil Storage..... | 24 |
| 2.6.1.1 Momento Volcante | 24 |
| 2.6.1.2 Resistencia al Momento Volcante..... | 26 |
| 2.6.2 NCh2369 Of.2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales | 27 |
| 2.7 Aplicación de modelo lineal para estanques de la industria | 29 |
| Capítulo 3 DESCRIPCIÓN DE DAÑOS | 33 |
| 3.1 Estanques Montados Sobre Patas..... | 33 |
| 3.1.1 Descripción | 33 |
| 3.1.2 Fallas y daños..... | 36 |
| 3.2 Estanques de Apoyo Continuo..... | 44 |
| 3.2.1 Descripción | 44 |
| 3.2.2 Fallas y daños..... | 50 |
| 3.3 Soluciones básicas y recomendaciones..... | 66 |

| | |
|--|-----|
| Capítulo 4 ANÁLISIS GRUPO DE ESTANQUES DE LA INDUSTRIA | 72 |
| Capítulo 5 CONCLUSIONES | 96 |
| 5.1 Resumen del Trabajo | 96 |
| 5.2 Conclusiones..... | 96 |
| 5.3 Limitaciones del Trabajo y Trabajo Futuro | 98 |
| REFERENCIAS..... | 100 |
| ANEXO A | 102 |
| A.1 Características del Estanque..... | 102 |
| A.2 Solicitaciones..... | 102 |
| A.3 Dimensionamiento General | 103 |
| A.4 Diseño del Manto..... | 104 |
| A.4 Plancha de Fondo..... | 104 |
| A.5 Diseño Sísmico del Estanque..... | 105 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Valles incluidos en el trabajo..... | 8 |
| Figura 2.1: Zona de Ruptura y Valles incluidos en el trabajo | 13 |
| Figura 2.2: Producción de Vinos en Chile por Región, 2006..... | 16 |
| Figura 2.3: Valles de Producción en Chile | 16 |
| Figura 2.4: Modelo de Housner | 18 |
| Figura 2.5: Estanque cilíndrico modelo de Housner..... | 19 |
| Figura 2.6: Estanque cilíndrico esbelto modelo de Housner | 19 |
| Figura 2.7: Estanque cilíndrico modo convectivo | 20 |
| Figura 2.8: Esquema del modelo lineal | 31 |
| Figura 2.9: Masas impulsiva y convectiva como fracción de la masa total..... | 32 |
| Figura 3.1-1: Estanque montado sobre patas | 33 |
| Figura 3.1-2: Estanque montado sobre patas con fondo plano | 34 |
| Figura 3.1-3: Estanque montado sobre patas con fondo cónico | 34 |
| Figura 3.1-4: Estanque sobre patas con sistema de rigidización de fondo..... | 34 |
| Figura 3.1-5: Estanque con patas soldadas al fondo | 35 |
| Figura 3.1-6: Estanque con patas soldadas al fondo y al manto..... | 35 |
| Figura 3.1-7: Estanque con pata central | 36 |
| Figura 3.1-8: Estructura típica de pata | 37 |
| Figura 3.1-9: Colapso lateral de patas | 38 |
| Figura 3.1-10: Falla en perno de regulación..... | 38 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.1-11: Formación de doble rótula | 39 |
| Figura 3.1-12: Pandeo Severo | 39 |
| Figura 3.1-13: Desprendimiento de patas | 40 |
| Figura 3.1-14: Desprendimiento de patas | 41 |
| Figura 3.1-15: Desprendimiento de patas | 41 |
| Figura 3.1-16: Estanque afectado por punzonamiento..... | 42 |
| Figura 3.1-17: Estanque afectado por punzonamiento..... | 42 |
| Figura 3.1-18: Canaleta sin rejilla..... | 43 |
| Figura 3.1-19: Colapso por vaciado rápido | 43 |
| Figura 3.2-1: Estanques de apoyo continuo (acero inoxidable) | 44 |
| Figura 3.2-2: Estanques de apoyo continuo (hormigón armado)..... | 45 |
| Figura 3.2-3: Silla de anclaje 3 placas..... | 46 |
| Figura 3.2-4: Silla de anclaje en L..... | 47 |
| Figura 3.2-5: Silla de anclaje 2 placas..... | 47 |
| Figura 3.2-6: Silla de anclaje en L anganchada | 48 |
| Figura 3.2-7: Silla de anclaje en L con atiesador..... | 48 |
| Figura 3.2-8: Plancha de anclaje..... | 49 |
| Figura 3.2-9: Estanque emplazado sobre losa | 49 |
| Figura 3.2-10: Estanques emplazados sobre tortas | 50 |
| Figura 3.2-11: Pandeo punta adiamantada, anclajes con anillo rigidizador..... | 51 |
| Figura 3.2-12: Pandeo punta adiamantada, anclajes individuales | 52 |
| Figura 3.2-13: Pandeo global simple..... | 53 |
| Figura 3.2-14: Pandeo global múltiple severo | 53 |
| Figura 3.2-15: Largo insuficiente de pernos | 54 |
| Figura 3.2-16: Instalación muy cercana a los bordes | 54 |
| Figura 3.2-17: Esquema arrancamiento de perno | 55 |
| Figura 3.2-18: Esquema rotura lateral de fundación | 55 |
| Figura 3.2-19: Rotura lateral de fundación | 56 |
| Figura 3.2-20: Esquema falla de hormigón de fundación | 56 |
| Figura 3.2-21: Falla de hormigón de fundación | 57 |
| Figura 3.2-22: Corrosión en anclajes | 58 |
| Figura 3.2-23: Desprendimiento de fondo | 58 |
| Figura 3.2-24: Estanque volcado..... | 59 |
| Figura 3.2-25: Falla de manto por succión | 60 |
| Figura 3.2-26: Falla de manto por succión | 61 |
| Figura 3.2-27: Falla en zona de portalón..... | 62 |
| Figura 3.2-28: Falla en soldadura inferior de portalón..... | 62 |
| Figura 3.2-29: Falla en soldadura de válvula..... | 63 |
| Figura 3.2-30: Falla en pared de estanque de hormigón por esfuerzos de flexión | 64 |
| Figura 3.2-31: Falla en pared de estanque de hormigón por esfuerzos de corte .. | 65 |
| Figura 3.2-32: Falla de fundación..... | 65 |
| Figura 3.3-1: Práctica de enfalde deficiente | 708 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.3-2: Práctica de enfalde mejorada | 68 |
| Figura 3.3-3: Anclajes individuales y Zona anclaje con sistema rigidizador | 69 |
| Figura 3.3-4: Falda no anclada..... | 69 |
| Figura 3.3-5: Distribución ineficiente de anclajes | 70 |
| Figura 3.3-6: Estanques con patas arriostradas..... | 71 |
| Figura 4.1-1: Modelo de aplicación de Ecuación de Navier | 75 |
| Figura 4.1-2: Tensiones admisibles API650-NCh2369..... | 77 |
| Figura 4.1-3: Factores de Utilización API650-NCh2369..... | 77 |
| Figura 4.1-4: Espectros para análisis lineal..... | 78 |
| Figura 4.1-5: Zonas de registro para espectro promedio | 79 |
| Figura 4.1-6: Espectro promedio N-S..... | 79 |
| Figura 4.1-7: Espectro promedio E-W | 80 |
| Figura 4.1-8: Relación Período-FU estanques montados sobre losa | 88 |
| Figura 4.1-9: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre losa..... | 89 |
| Figura 4.1-10: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre losa | 90 |
| Figura 4.1-11: Relación Espesor-FU estanques montados sobre losa | 91 |
| Figura 4.1-12: Relación Período-FU estanques montados sobre torta | 92 |
| Figura 4.1-13: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre torta | 93 |
| Figura 4.1-14: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre torta..... | 94 |
| Figura 4.1-15: Relación Espesor-FU estanques montados sobre torta..... | 95 |
| Figura A.1: Asíntota razón de anclaje | 107 |
| Figura A.2: Anclaje tipo 2 | 109 |
| Figura A.3: Geometría anclaje de borde | 111 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1: Datos Terremoto..... | 14 |
| Tabla 2.2: Tabla 5.7 Nch 2369 | 29 |
| Tabla 2.3: Valores de diseño recomendados | 31 |
| Tabla 4.1: Factores Tabla 3.1 ($H/R = 2,713$)..... | 73 |
| Tabla 4.2: Períodos Modales..... | 73 |
| Tabla 4.3: Aceleraciones espectrales Nch2369 | 73 |
| Tabla 4.4: Datos Estanque..... | 74 |
| Tabla 4.5: Masas y Alturas para el modelo | 74 |
| Tabla 4.6: Tensiones de fluencia y admisible acero 304L..... | 76 |
| Tabla 4.7: Aceleraciones espectrales Curicó (N-S)..... | 76 |
| Tabla 4.8: Clasificación para evaluación de daños | 80 |
| Tabla 4.9: Tensiones asociadas al espectro promedio vertical | 81 |
| Tabla 4.10: Resultados Espectro de diseño Nch2369, $R=1$ | 82 |
| Tabla 4.11: Resultados Espectro de diseño Nch2369, $R=4$ | 83 |
| Tabla 4.12: Resultados Espectro de respuesta elástica, Curicó (N-S)..... | 84 |

| | |
|--|----|
| Tabla 4.13: Resultados Espectro de respuesta elástica, Curicó (E-W) | 85 |
| Tabla 4.14: Resultados Espectro de respuesta elástica promedio (N-S) | 86 |
| Tabla 4.15: Resultados Espectro de respuesta elástica promedio (E-W) | 87 |
| Tabla 4.16: Relación Período-FU estanques montados sobre losa | 88 |
| Tabla 4.17: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre losa | 89 |
| Tabla 4.18: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre losa..... | 90 |
| Tabla 4.19: Relación Espesor-FU estanques montados sobre losa..... | 91 |
| Tabla 4.20: Relación Período-FU estanques montados sobre torta..... | 92 |
| Tabla 4.21: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre torta..... | 93 |
| Tabla 4.22: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre torta | 94 |
| Tabla 4.23: Relación Espesor-FU estanques montados sobre torta | 95 |

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.

1.1 Introducción.

El desarrollo productivo de la industria vitivinícola, al igual que el resto de las industrias nacionales, requiere evitar grandes daños y pérdidas ante la eventualidad de un sismo.

Los hechos ocurridos el 27 de febrero de 2010, han dejado en evidencia que para lograr un desarrollo sustentable de la industria es indispensable modificar las prácticas actuales, en especial si se tiene en consideración el carácter de altísima sismicidad que posee el territorio chileno.

Este trabajo nace de las necesidades mencionadas anteriormente, y de la oportunidad única que otorga el evento sísmico del 27 de febrero de 2010 para recopilar información actualizada del comportamiento de los elementos de la industria, en base a las prácticas con que son manejados.

El trabajo realizado está marcado por una etapa primaria de inspección, revisión y caracterización de los daños y fallas en un grupo de viñas pertenecientes a las zonas más afectadas por el terremoto, a través de visitas a terreno. En una segunda etapa se elabora un manual de buenas prácticas y recomendaciones, basadas en el estudio de los efectos del terremoto sobre los elementos de la industria.

El generar recomendaciones para el diseño e instalación de estanques de acero inoxidable tiene como motivación primera dar solución a un problema real que aqueja a esta industria, y en segunda instancia formular un documento de referencia para las diversas empresas nacionales que hacen uso de estos estanques.

1.2 Objetivos.

Los principales objetivos a desarrollar en este trabajo de título son los que se describen a continuación:

- Determinación y evaluación de daños generados en estanques de acero de la industria vitivinícola, por causa del terremoto del centro sur de Chile, del 27 de febrero de 2010.
- Proposición de soluciones y recomendaciones para las prácticas generales en el diseño, fabricación, instalación, disposición y manejo de estanques de acero.

1.3 Metodología.

El trabajo se enmarca dentro de un proyecto CORFO orientado a mejorar la industria vitivinícola nacional. Este proyecto es coordinado y guiado por los Consorcios del Vino (Vinnova y Tecnovid), quienes agrupan a la gran mayoría de viñas y viñedos chilenos, y ejecutado por tres equipos de trabajo conformados por expertos de la Universidad de Chile, Universidad Católica y Universidad de los Andes (esta última como participante en la primera etapa). La Figura 1.1 muestra los valles incluidos en el trabajo.

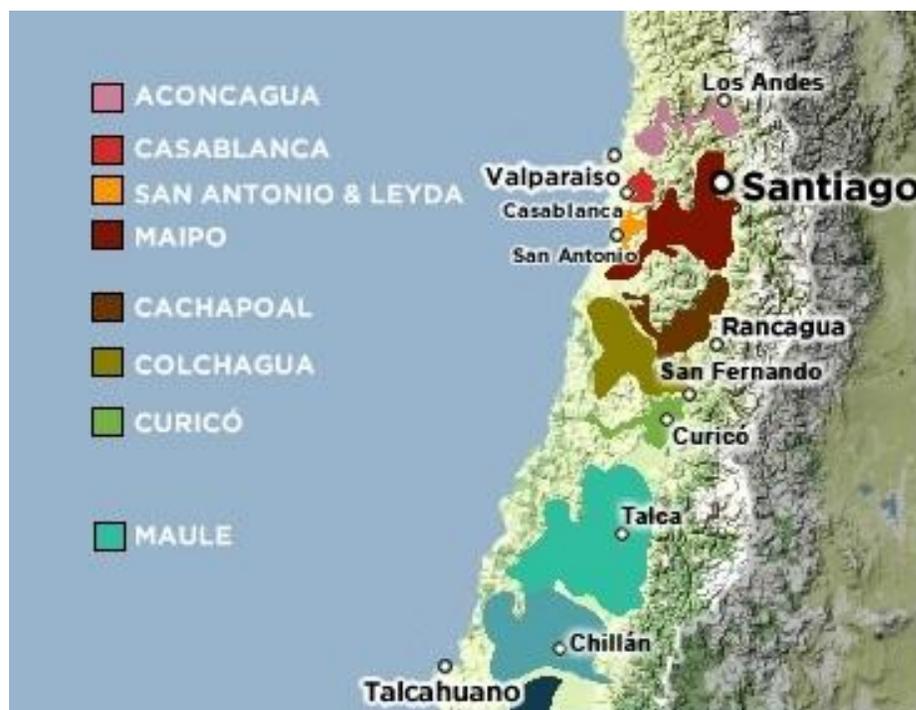


Figura 1.1: Valles incluidos en el trabajo

El proyecto contempla 4 etapas principales, éstas son:

1. Levantamiento de daños en la industria vitivinícola causados por el terremoto del 27 de febrero de 2010.

Esta etapa del trabajo consistió en visitas a 47 viñas correspondientes a las zonas más afectadas con el objetivo de recolectar información sobre el comportamiento deficiente en las estructuras de almacenaje y fermentación de vinos, además de elementos y/o prácticas que resultaron en comportamientos deseables. Para esto, las visitas fueron guiadas por personal de cada viña, quienes facilitaron información relevante y permitieron el registro fotográfico de los efectos del terremoto en bodegas. La etapa de levantamiento fue realizada durante los meses de Abril, Mayo y Junio de 2010, período en que aún era posible observar los efectos del terremoto en la industria.

Las viñas visitadas en esta etapa de levantamiento fueron las siguientes:

- Valle de Aconcagua:
 - Errázuriz
 - San Esteban

- Valle de Casablanca :
 - Casas del Bosque
 - Loma Larga
 - Veramonte

- Valle de San Antonio & Leyda:
 - Casa Marín

- Valle de Maipo:
 - Santa Rita
 - Pérez Cruz
 - Santa Ema
 - Undurraga
 - Concha y Toro

- Valle de Cachapoal:
 - La Rosa
 - Anakena
 - Morandé
 - Dos Andes

- Valle de Colchagua:

- Bisquertt
 - Casa Lapostolle
 - Casa Silva
 - San Miguel del Huique
 - Marchigüe/Errázuriz Ovalle
 - Estampa
 - Las Niñas
 - Laura Hartwig
 - Los Vascos
 - Luis Felipe Edwards
 - Montgras
 - Montes
 - Ravanal
 - Siegel
 - Viu Manent
 - Viñedos Emiliana
 - Santa Helena
 - Neyen de Apalta
- Valle de Curicó:
 - Miguel Torres
 - Valdivieso
 - Cavas Schroeder y Honke (Altacima)
 - Requiringua
 - La Fortuna
 - San Pedro
 - Terramater/Millaman
 - Vinícola Patacón
- Valle del Maule:
 - Balduzzi
 - Gilmore State (Tabontinaja)
 - J. Bouchon
 - Via Wines (San Rafael)
 - Chilean Wines
 - Lomas de Cauquenes

2. Procesamiento de información recolectada en terreno

Esta etapa del trabajo corresponde a la clasificación de los principales efectos del terremoto sobre los elementos catastrados, generándose de esta forma un reconocimiento formal de las principales fallas que se producen o que pueden producirse en las estructuras de almacenamiento y fermentación de vinos a partir de un evento sísmico de gran magnitud. Además, se analizan los mecanismos a través de los cuales se desarrollaron dichas fallas con el fin de establecer medidas para evitar su aparición.

3. Generación de manual de buenas prácticas y recomendaciones para estructuras de bodega de la industria del vino

En esta etapa se plasman de manera íntegra las etapas anteriores, dando a conocer los puntos débiles de las estructuras e indicando medidas posibles para atenuar y/o eliminar desempeños deficientes. Este manual es entregado a todas las viñas pertenecientes a los consorcios para el conocimiento y aplicación generalizada de los resultados.

4. Visitas a Terreno

En esta etapa se realizan visitas a algunas viñas que participan de este trabajo. En dichas visitas se busca lograr un acercamiento entre el manual y sus resultados y el personal y encargados de viñas. Es decir, se promueve la puesta en práctica de las recomendaciones; además se resuelven todas las dudas surgidas una vez conocido el trabajo. Para éstas visitas se incluyeron algunas viñas que no estuvieron contempladas en la etapa de levantamiento de daños, para así lograr una mayor promoción del proyecto. Las viñas visitadas en esta etapa son las siguientes:

- Valle de Casablanca :
 - Casas del Bosque
 - Indómita
 - Loma Larga
 - Veramonte

- Valle de San Antonio & Leyda:
 - Casa Marín
 - Garcés Silva
 - Matetic

- Valle de Maipo:
 - Chocalán
 - Cousiño Macul
 - De Martino
 - El Principal
 - Haras de Pirque
 - Huelquén
 - Portal del Alto
 - Pérez Cruz
 - William Fèvere

- Valle de Cachapoal:
 - Altair
 - Casas del Toqui
 - La Rosa
 - La Ronciere
 - Anakena
 - Morandé
 - Chateau Los Boldos

- Valle de Colchagua:
 - Bisquertt
 - Casa Lapostolle
 - Casa Silva
 - Estampa
 - Las Niñas
 - Laura Hartwig
 - Los Vascos
 - Montgras
 - Montes
 - Siegel
 - Neyen de Apalta

Capítulo 2 ANTECEDENTES.

2.1 Terremoto 27 Febrero 2010

El terremoto magnitud 8.8 (MW) del 27 de Febrero a las 03:34 a.m. ocurrido en la zona central de Chile, se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en un área que se extiende aproximadamente desde la Península de Arauco por el sur hasta el norte de Pichilemu, cubriendo unos 450 km de longitud en dirección prácticamente norte-sur por un ancho de unos 150 km. Esta zona de contacto entre las placas, cuya expresión superficial es la fosa marina que se ubica unos 130 km de la costa hacia el Oeste, se localiza a lo largo del plano inclinado que define el área de fallamiento causante del terremoto (Barrientos, 2010).

2.1.1 Parámetros Hipocentrales

El hipocentro, o lugar donde se inicia la ruptura, se ubicó en las coordenadas geográficas $36^{\circ} 17' 23''$ S y $73^{\circ} 14' 20''$ W a una profundidad estimada de 30 km (Barrientos, 2010). La Figura 2.1 muestra la zona de ruptura y la ubicación de los valles vitivinícolas que son parte de este estudio y que fueron afectados por el terremoto.



Figura 2.1: Zona de Ruptura y Valles incluidos en el trabajo

El segmento del contacto entre la placa de Nazca y Sudamericana que se activó (zona de falla) y produjo el terremoto del 27 de Febrero alcanzó un área del orden de 450 km x 150 km con un desplazamiento superior a 10 m. Es usual que la ruptura no ocurra simultáneamente en toda la extensión de la falla, sino que ésta comience en un punto (hipocentro) y luego se propague a una velocidad del orden de 2.5 a 3.5 km/s. Estimaciones del tiempo que tomó la ruptura en propagarse a lo largo de toda la falla activada están en el orden de 110 s. Los datos generales del terremoto son mostrados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Datos Terremoto (Barrientos, 2010)

| | |
|--------------|------------------------------------|
| Hora UTC: | 06:34:08 27/02/2010 |
| Latitud: | -36 17' 23" |
| Longitud: | -73 14' 20" |
| Profundidad: | 30.1 km |
| Magnitud: | 8.8 (Mw) GS |
| Fuente: | Servicio Sismológico (U. de Chile) |

2.1.2 Daños en Industria del Vino

Según estimaciones de la industria vitivinícola, el terremoto causó la pérdida de entre 100 y 200 millones de litros de vino embotellado, a granel y de guarda, producto de los daños que sufrieron las distintas bodegas de las compañías, desde la V a la VIII regiones. El impacto en la infraestructura fue considerable debido a que el terremoto afectó severamente al corazón de la industria vitivinícola chilena: las zonas de Maipo, Cachapoal, Colchagua, Curicó y Maule. Sin embargo, dado que el terremoto ocurrió en el período en que la industria vitivinícola nacional comenzaba sus actividades de vendimia, el daño y las pérdidas no fueron tan catastróficos como pudieron ser en el caso de haber ocurrido después de la vendimia, donde el almacenaje hubiese sido mucho mayor. La vendimia corresponde al período de entre 3 y 4 meses (1/3 del año) en el cual se realiza la producción del vino, ésta comienza los primeros días de febrero y termina entre abril y marzo.

2.2 Antecedentes Generales

Los estanques de acero para almacenamiento de vino pueden ser incluidos en el amplio grupo de estanques atmosféricos de acero para almacenamiento. Durante la historia de la industria mundial han ocurrido una serie de eventos sísmicos de importancia que han permitido observar daños en este tipo de estanques. Entre éstos se encuentra el terremoto de Long Beach (USA, 1933), Kern County (USA, 1952), Alaska (USA, 1964), San Fernando (USA, 1971), Imperial Valley (USA, 1979), Loma Prieta (USA, 1989) y Kobe (Japón, 1995), entre otros.

Las primeras investigaciones acerca del comportamiento sísmico de estanques anclados para el almacenamiento de líquidos nos permiten lograr una importante

inserción en el efecto de la interacción hidrodinámica fluido-estructura durante la respuesta sísmica. Jacobsen (1949) fue el primer investigador que estudió el comportamiento sísmico de estanques cilíndricos rígidos. Housner (1963), Haroun y Housner (1981), Veletsos y Yang (1977), y Veletsos (1974) indicaron que un estanque cilíndrico que contiene líquido desarrolla un modo tipo viga cantiléver cuando es sometido a sollicitaciones horizontales.

Housner (1963) evaluó la respuesta hidrodinámica del sistema estanque-líquido como la contribución de dos componentes, el modo convectivo (porción superior del contenido que vibra con un período largo) y el modo impulsivo (porción del contenido que se mueve de manera rígida con el estanque). (J.C. Virella, L.A. Godoy, L.E Suarez, 2005).

La industria vitivinícola nacional ha demostrado un gran interés en el estudio del comportamiento y desempeño de sus estructuras de almacenamiento frente a eventos sísmicos, siendo una muestra clara de ello el desarrollo del Manual de Buenas Prácticas y Recomendaciones Sísmicas para Equipos de Bodegas Viníferas asociado a este trabajo y en torno al cual se han desarrollado trabajos de interés que han hecho importantes aportes al conocimiento. Se puede nombrar por ejemplo, el desarrollo de un sistema de protección sísmica para estanques de acero inoxidable de pared delgada con patas (Sandoval, 2011).

2.3 Industria Vitivinícola

La vitivinicultura es un sector de gran dinamismo en Chile, en términos de producción, exportaciones y generación de empleos.

Según cifras de 2004, Chile está ubicado en el lugar número 11 entre los principales productores de vino del mundo, con una producción equivalente al 2,1% del volumen producido en el mundo. Ese mismo año, las exportaciones llegaron al 6,15% del volumen exportado en el mundo, lo que ubica a nuestro país en el puesto número 5 entre los países exportadores (El sector vitivinícola en Chile, 2007).

La producción de vinos se concentra fuertemente en la Región del Maule, que produce cerca del 50% del volumen. Le siguen en importancia las regiones del Libertador Bernardo O'Higgins y Metropolitana. La figura 2.2 muestra los niveles de producción por región.

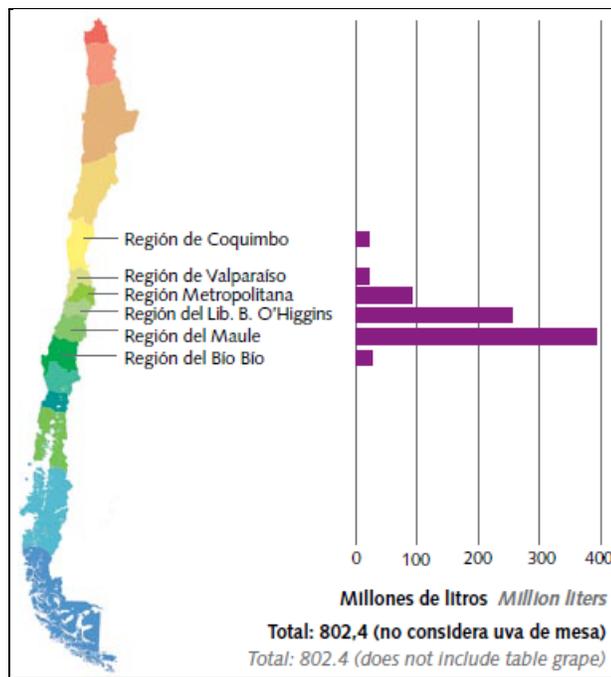


Figura 2.2: Producción de Vinos en Chile Por Región, 2006 (El sector vitivinícola en Chile, 2007)

La producción nacional se desarrolla en los valles del Elqui, Limarí, Choapa, Aconcagua, Casablanca, San Antonio, Maipo, Cachapoal, Colchagua, Curicó, Maule, Itata, Bío Bío y Malleco. La Figura 2.3 muestra la ubicación geográfica de estos valles.

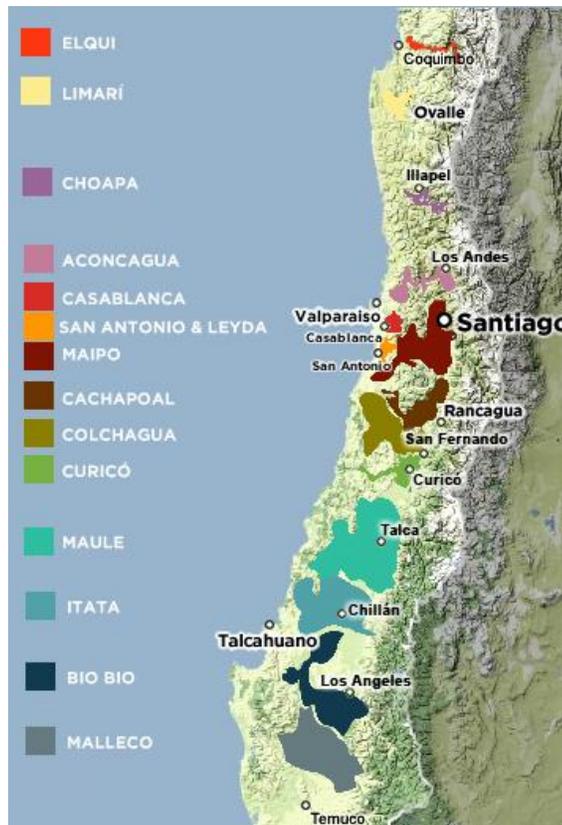


Figura 2.3: Valles de producción en Chile (winesofchile.org)

2.4 Descripción de Estanques y Criterios de Selección

Los estanques a analizar son casi en su totalidad estanques de acero inoxidable y pueden ser caracterizados de acuerdo a los siguientes ítems:

- Altura: La altura de los estanques, por lo general, va de 1,5 a 5 metros.
- Volumen de almacenamiento: Los volúmenes de los estanques varían entre 5.000 Lt. y 650.000 Lt. Con una mayor concentración de estanques entre 20.000 Lt. a 30.000 Lt. y 50.000 Lt. a 60.000 Lt.
- Tipo de emplazamiento: Los estanques se encuentran emplazados bajo 3 modalidades predominantes, éstas son:
 - Sobre Patas
 - Apoyada
 - Enfaldada

El terremoto del 27 de febrero de 2010, ha dejado en evidencia la necesidad de generar un cambio en las prácticas actuales con que se desarrolla la actividad vitivinícola en nuestro país. Esta evidencia está dada por diversos daños, fallas y colapsos, que incluyen la totalidad de los elementos funcionales de esta industria, estos elementos son los siguientes:

- Barricas
- Estanques de acero
- Racks
- Bins

Dada la magnitud de los daños en los estanques de acero y su especial vulnerabilidad e influencia en la industria, se analizarán de manera especial en el presente trabajo.

Para este análisis es necesario definir primeramente un grupo de elementos que permitan establecer cuáles son las necesidades de cambio a las que se hizo referencia; este grupo de elementos es tomado de la industria vitivinícola emplazada en las regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule. El grupo de elementos extraídos de estas zonas, mostraron diversos comportamientos, desde excelentes hasta desastrosos, estos comportamientos son muy valorados, ya que permitirán establecer puntos de comparación entre buenas y malas prácticas.

2.5 Modelo de Housner

En 1954 G. W. Housner (Earthquake pressures on fluid containers, Housner, 1954) desarrolló una metodología capaz de solucionar una gran variedad de problemas aplicando ecuaciones que simplifican el análisis de, entre otros, estanques cilíndricos. Además define un modelo que representa la interacción líquido-estanque, donde entrega dos conceptos fundamentales: una parte del agua se mueve al unísono con el estanque, a esta masa se llama masa impulsiva (M_0 en Figura 2.4). La masa restante de agua llamada masa convectiva, la cual se divide en una serie de porciones que se mueven en forma separada al estanque (M_1, M_3, M_5 en Figura 2.4).

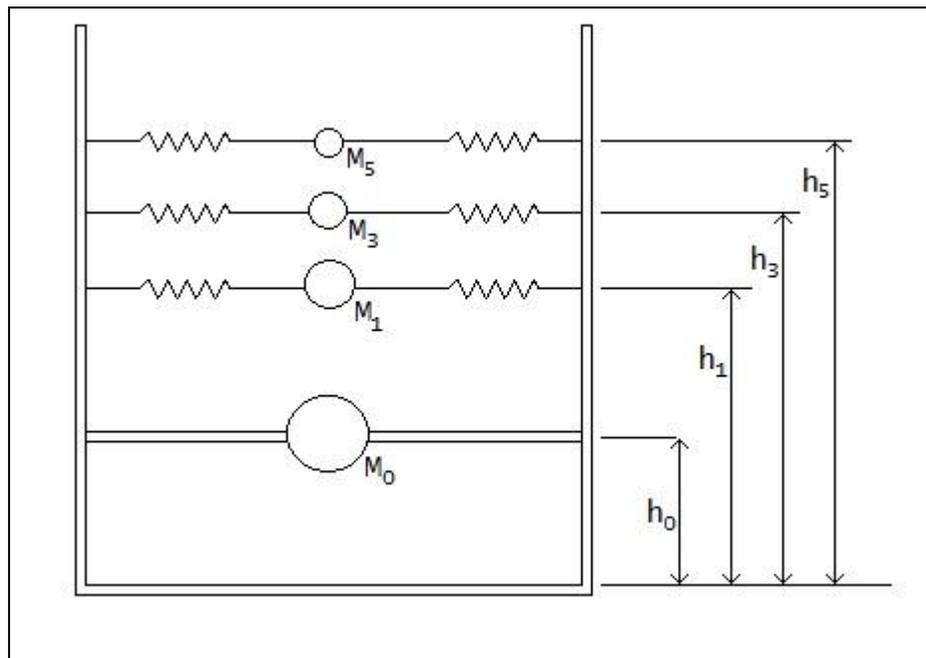


Figura 2.4: Modelo de Housner

2.5.1 Masa Impulsiva

Housner indicó que si se considera un estanque cilíndrico como el de la figura 2.5 y se toma el fluido contenido entre membranas paralelas al eje X, la franja de espesor unitario puede ser tratada como un estanque rectangular muy angosto, lo que permite utilizar las ecuaciones hidrodinámicas asociadas y el principio de Hamilton. Con esto, la presión ejercida contra la pared del estanque circular es la siguiente:

$$p_w = -\rho \dot{h} \sqrt{3} \left(\frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \tanh \left(\sqrt{3} \frac{R}{h} \cos \theta \right) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Y la presión sobre el fondo del estanque es:

$$p_b = -\rho\mu_0 h\sqrt{3} \frac{\sinh\sqrt{3}\frac{x}{h}}{2\cosh\sqrt{3}\frac{l}{h}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

$$l^2 = R^2 + x^2$$

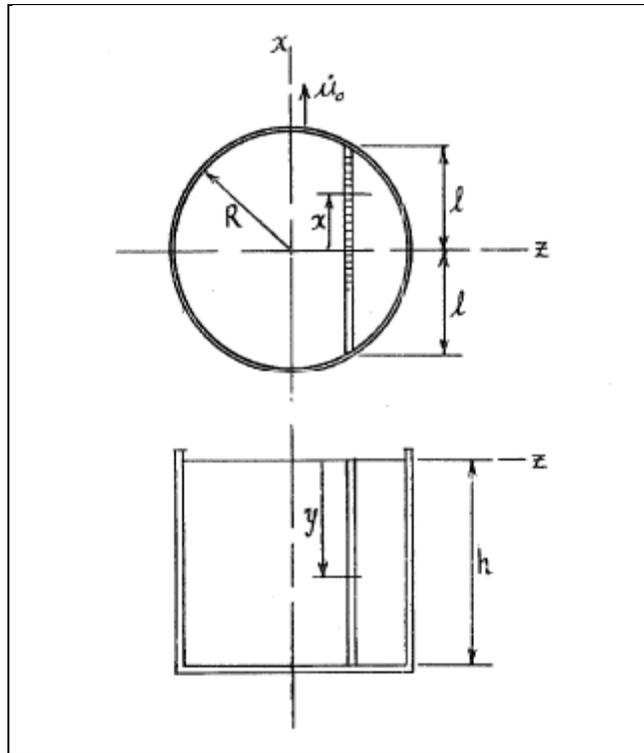


Figura 2.5: Estanque cilíndrico modelo de Housner (Housner, 1954)

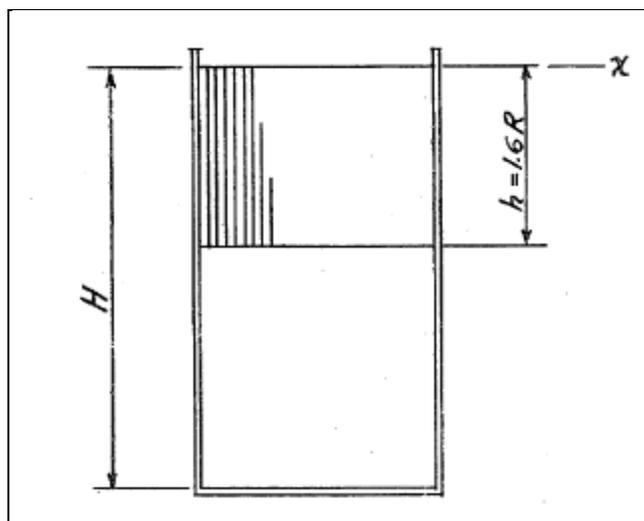


Figura 2.6: Estanque cilíndrico esbelto modelo de Housner (Housner, 1954)

Para estanques angostos y altos, con una razón $h/R > 1,6$ (Figura 2.6), el fluido bajo la profundidad h debe ser considerado como una masa que se mueve solidaria al estanque como un cuerpo rígido. Para obtener la presión sobre la pared del estanque en este caso, se utiliza la siguiente expresión modificada:

$$p_w = -\rho\dot{\mu}_0 h \sqrt{3} \tanh \sqrt{3} \frac{R}{h} \left(\frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \cos \theta \quad (\text{Ec. 2.3})$$

De esta expresión, la fuerza total ejercida sobre la pared del estanque es:

$$\int_0^h \int_0^{2\pi} p_w \cos \theta R d\theta dy = -\rho\dot{\mu}_0 \pi R^2 h \frac{\tanh \sqrt{3} \frac{R}{h}}{\sqrt{3} \frac{R}{h}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

De lo cual se ve que la fuerza ejercida es equivalente a una masa M_0 que se mueve solidaria al estanque, donde:

$$M_0 = M \frac{\tanh \sqrt{3} \frac{R}{h}}{\sqrt{3} \frac{R}{h}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Para ejercer un momento igual a la presión del fluido sobre la pared del estanque, la masa equivalente M_0 debe aplicarse a una altura h_0 específica:

$$h_0 = \frac{3}{8} h \left(1 + \frac{4}{3} \left(\frac{\sqrt{3} \frac{R}{h}}{\tanh \sqrt{3} \frac{R}{h}} - 1 \right) \right) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

2.5.2 Masa Convectiva

Para examinar el primer modo de vibración del fluido se consideran las restricciones provistas por las membranas libres de girar, como muestra la figura 2.7:

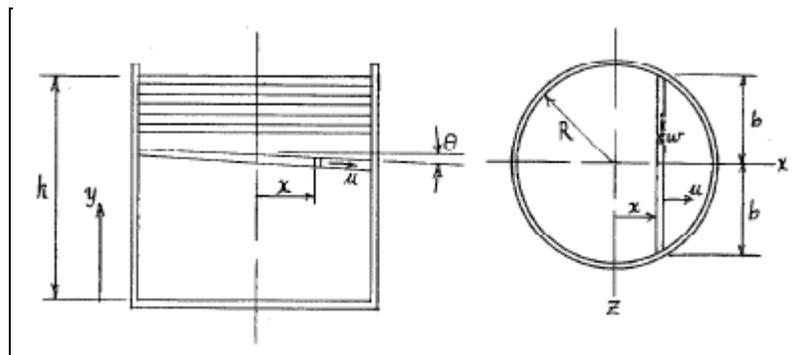


Figura 2.7: Estanque cilíndrico modo convectivo (Housner, 1954)

Sean u, v, w , las componentes x, y, z de la velocidad y sean descritas las restricciones en el flujo por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial(ub)}{\partial x} = -b \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$v = x\dot{\theta} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Estas ecuaciones indican que todo el fluido para un par (x,y) dado, se mueve con la misma velocidad v , y el fluido en un x dado se mueve con una velocidad uniforme u . De estas ecuaciones se tiene:

$$u = -\frac{1}{b} \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \int_{-R}^x xb \, dx \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$w = z \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \int_{-R}^x xb \, dx \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde:

$$b' = \frac{\partial b}{\partial x}$$

Luego, la energía cinética total es:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \rho \int_0^H \int_{-R}^R \int_{-b}^b \left(x^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{b^2} \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \right)^2 \left(\int_{-R}^x xb \, dx \right)^2 \left(1 + z^2 \frac{b'^2}{b^2} \right) \right) dx dy dz \quad (\text{Ec. 2.12}) \\ &= \frac{1}{2\rho} \int_0^h \left(I_z \dot{\theta}^2 + K \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \right)^2 \right) dy \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} I_z &= \int_A x^2 dA \\ K &= 2 \int_{-R}^R \frac{1}{b} \left(\int_{-R}^x bx \, dx \right)^2 \left(1 + \frac{b'^2}{3} \right) dx \end{aligned}$$

La energía potencial del fluido es:

$$V = \frac{1}{2} g \rho \theta_h^2 \int x^2 dx dz = \frac{1}{2} g \rho \theta_h^2 I_z \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Por el principio de Hamilton:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V) dt = 0 \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} \rho \left(\int_0^h \left(I_z \dot{\theta}^2 + \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \right)^2 K \right) dy - g \theta_h^2 I_z \right) dt = 0$$

$$\iint_{t_1 0}^{t_2 h} \rho \left(I_z \dot{\theta} + \left(\frac{\partial^2 \dot{\theta}}{\partial y^2} \right) \right) \delta \dot{\theta} dx dt + \int_{t_1}^{t_2} \rho \left(K^2 \left(\frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial y} \right)_h + g I_z \theta_h \right) \delta \theta_h dt = 0$$

Esto entrega las dos ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial^2 \dot{\theta}}{\partial y^2} - \frac{I_z}{K} \dot{\theta} = 0 \quad (\text{Ec. 2.15})$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)_h + g I_z \theta_h = 0 \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Con esto, se obtiene para vibraciones libres:

$$\theta = \theta_0 \frac{\sinh \sqrt{\frac{I_z}{K}} y}{\sinh \sqrt{\frac{I_z}{K}} h} \sin \omega t \quad (\text{Ec. 2.17})$$

$$\omega^2 = g \sqrt{\frac{I_z}{K}} \tanh \sqrt{\frac{I_z}{K}} h \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Para estanques circulares se tiene:

$$I_z = \frac{\pi R^4}{4} \quad K = \frac{2\pi}{27} R^6$$

Luego:

$$\omega^2 = \frac{g}{R} \sqrt{\frac{27}{8}} \tanh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right)$$

La presión sobre la pared es:

$$p_w = -\rho \frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial y} \frac{R^3}{3} \left(1 - \frac{\cos^2 \theta}{3}\right) \cos \theta \quad (\text{Ec. 2.19})$$

La fuerza horizontal resultante ejercida sobre la pared es:

$$P = -\pi \frac{\rho w^2 R^4 \theta_0 \sin wt}{4} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

La masa convectiva oscilante equivalente es:

$$M_1 = \frac{M}{4} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{R}{h} \tanh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right) \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Y su movimiento armónico está dado por:

$$x_1 = \left(\frac{\theta_0 h}{\sqrt{\frac{27h}{8R}} \tanh \sqrt{\frac{27h}{8R}}} \right) \sin wt \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Para que la masa convectiva equivalente genere sobre la pared del estanque la misma presión que el líquido contenido, se necesita que ésta masa esté aplicada a una altura:

$$h_1 = h \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{27h}{8R}} \tanh \left(\sqrt{\frac{27h}{8R}} \right)} + \frac{1}{\sqrt{\frac{27h}{8R}} \sinh \left(\sqrt{\frac{27h}{8R}} \right)} \right) \quad (\text{Ec. 2.23})$$

La presión ejercida en la base del estanque, genera un momento igual a:

$$\frac{10}{48} \sqrt{\frac{3}{8}} \frac{\pi R^5 \rho w^2}{\sinh \sqrt{\frac{27h}{8R}}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Incluyendo esto, el momento correcto total ejercido sobre el estanque es producido cuando:

$$h_1 = h \left(1 - \frac{2 \cosh \left(\sqrt{\frac{27h}{8R}} \right) - \frac{31}{16}}{\sqrt{\frac{27h}{8R}} \sinh \left(\sqrt{\frac{27h}{8R}} \right)} \right) \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Estos estudios realizados por Housner (1954) son la base utilizada hoy en día en la gran mayoría de las normas y recomendaciones de diseño sísmico de estanques de acero, lo cual incluye a las normas API650, AWWA y NZ; que son las normas cuyo procedimiento de diseño adopta la NCh2369.

2.6 Revisión normas API650 y NCh2369

En nuestro país se aplican, en general, las normas norteamericanas de diseño y construcción del (American Petroleum Institute API) para productos petroleros y de la (American Waterworks Association AWWA) y el (American Concrete Institute ACI) para agua. También se han usado las recomendaciones de la (New Zealand National Society for Earthquake Engineers NZ), aplicables a cualquier líquido y material.

Todas las normas tienen dos secciones importantes, la Sísmica que determina los esfuerzos sísmicos considerando la ubicación, riesgo y seguridad requerida, y la de Diseño que permite dimensionar los estanques y sus fundaciones.

Con esto, la metodología para el diseño de estanques en Chile incluye una etapa de especificación de la acción sísmica de acuerdo con nuestras condiciones, estipuladas en la NCh2369. Conocidas las fuerzas sísmicas el diseño se realiza mediante la adopción de alguna de las normas anteriores. En esta sección, se hará una breve revisión de los puntos relevantes según los daños vistos en terreno, para lo cual se tomará como referencia la API Std 650.

2.6.1 API Std 650 Welded Tanks for Oil Storage

Esta norma se ocupa del diseño, fabricación, instalación y requisitos básicos para la puesta en operación de estanques de acero soldado para almacenamiento. Es aplicable únicamente a estanques atmosféricos de fondo plano apoyados de manera uniforme, y dado que en su desarrollo no presenta límites en cuanto a tamaño, permite un diseño ajustado a las necesidades de la industria.

Esta norma consta de 26 apéndices y 10 secciones, con distintas recomendaciones para la definición y diseño estructural. El diseño sísmico para estanques de acero para almacenamiento es revisado en el apéndice E.

2.6.1.1 Momento Volcante

El momento volcante en la base del estanque se calcula por aplicación de suma SRSS (square root of the sum of the squares) de las componentes impulsiva y convectiva que generan momento.

$$M_{rw} = \sqrt{(A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r))^2 + (A_c W_c X_c)^2} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

- A_i : Coeficiente sísmico impulsivo de aceleración del espectro de respuesta de diseño.
 A_c : Coeficiente sísmico convectivo de aceleración del espectro de respuesta de diseño.
 W_i : Porción impulsiva de la masa del contenido, aplicada a una altura X_i .
 W_c : Porción convectiva de la masa del contenido, aplicada a una altura X_c .
 W_s : Masa del cuerpo del estanque, aplicada a una altura X_s .
 W_r : Masa del techo del estanque, aplicada a una altura X_r .

Para calcular M_{rw} asociado a un registro sísmico en particular, se requiere conocer los centros de acción de las masas responsables de las fuerzas que lo generan, que son W_i (porción impulsiva), W_s (manto), W_r (techo) y W_c (porción convectiva). Además, es indispensable conocer las aceleraciones A_i y A_c .

Estos valores son definidos en el anexo E, según sigue:

$$W_i = \begin{cases} \frac{\tanh(0.866\frac{D}{H})}{0.866\frac{D}{H}} W_P & \frac{D}{H} \geq 1.333 \\ \left(1.0 - 0.218\frac{D}{H}\right) W_P & \frac{D}{H} < 1.333 \end{cases} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

$$W_c = 0.230 \frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3.67H}{D}\right) W_P \quad (\text{Ec. 2.28})$$

W_P : Peso total del contenido del estanque basado en el peso específico de éste.

$$X_i = \begin{cases} 0.375H & \frac{D}{H} \geq 1.333 \\ \left(0.5 - 0.094\frac{D}{H}\right) H & \frac{D}{H} < 1.333 \end{cases} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

$$X_c = \left(1.0 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67H}{D} \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right) H \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Donde:

D : Diámetro del estanque.

H : Altura del estanque.

Los coeficientes sísmicos pueden ser calculados utilizando espectros de respuesta específicos para cada zona, en los que se considera tipo de falla, actividad

sísmica, condición del suelo, etc. Para el coeficiente impulsivo se debe usar una razón de amortiguamiento del 2%, mientras que el coeficiente convectivo se obtiene del espectro con razón de amortiguamiento de 0.5%.

2.6.1.2 Resistencia al Momento Volcante

Según el acápite E.6.2.1 (API650, 2008) la resistencia de diseño al momento volcante en la base del estanque puede ser provista por:

- El peso del estanque, más el peso del techo sobre el estanque W_{rs} , y por el peso de una porción del contenido del estanque adyacente al revestimiento, para estanques sin anclaje.
- Dispositivos de anclaje mecánico.

Para estanques anclados, la resistencia al volcamiento está dada por el peso del manto y la acción del anclaje. Para estanques no anclados, la resistencia al volcamiento está dada por el peso de una porción del contenido del estanque adyacente al manto. El peso de esta porción depende del ancho de la placa basal bajo el manto que se levanta y está dado por:

$$w_a = 99t_a\sqrt{F_yHG_e} \leq 201.1HDG_e \quad (\text{Ec. 2.31})$$

Esta ecuación aplica exista o no una placa inferior engrosada. Si w_a es mayor que el límite indicado en Ec.2.6, entonces $w_a = 201.1HDG_e$ y $L = 0,035D$. Un valor de L (arbitrario elegido por quien diseña) definido como $L_S < L$ puede ser usado, en ese caso w_a se calculará como sigue:

$$w_a = 5742HG_eL_S \quad (\text{Ec. 2.32})$$

$$L = 0.01723t_a \sqrt{\frac{F_y}{HG_e}} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

L corresponde al ancho mínimo requerido de placa inferior engrosada medida desde la fibra interior de la virola inferior.

Para determinar el criterio de anclaje, se establece una razón de anclaje, J :

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2[w_t(1-0.4A_v)+w_a-0.4w_{int}]} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Luego, según la tabla E.6 del estándar API650, los criterios son los siguientes:

- Si $J \leq 0.785$: Levantamiento no calculado bajo momento volcante del diseño sísmico. El estanque es autoanclado.
- Si $0.785 < J \leq 1.54$: El estanque es levantado, pero es estable para la carga de diseño. El estanque es autoanclado.
- Si $J > 1.54$: El estanque no es estable y debe ser mecánicamente anclado para la carga de diseño.

En el acápite E.6.2.1.2 la norma indica que si la configuración del estanque es tal que los requerimientos para el autoanclaje no son reunidos, éste debe ser anclado con dispositivos mecánicos como pernos de anclaje o correas. Estas últimas corresponden a placas que generalmente van enganchadas y/o soldadas.

Los anclajes serán dimensionados para proveer al menos la siguiente resistencia mínima:

$$W_{AB} = \left(\frac{1.273M_{rw}}{D^2} - w_t(1 - 0.4A_v) \right) \quad (\text{Ec. 2.35})$$

La carga de diseño sísmico para anclaje, está definida por:

$$P_{AB} = W_{AB} \left(\frac{\pi D}{n_A} \right) \quad (\text{Ec. 2.36})$$

Según E.7.1.2 al menos 6 anclajes deben ser provistos, el espaciamiento entre anclajes no debe exceder los 3 metros.

Cuando se usan pernos de anclaje, deben tener un diámetro mínimo de 25 mm, excluyendo tolerancia a la corrosión. Anclajes de pernos enganchados u otro sistema de anclaje basado únicamente en el contacto o fricción mecánica no serán usados cuando el apéndice E solicita un diseño sísmico.

2.6.2 NCh2369 Of.2003 Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales

Esta Norma está basada en la experiencia registrada a partir de comportamientos de estructuras, equipos e instalaciones industriales durante los sismos de 1960 en la zona centro-sur, y de 1985 en la zona central del país. La seguridad sísmica que establecen las disposiciones de esta norma es alta ya que por tratarse de instalaciones industriales, se dan algunas situaciones de cuidado:

- Las pérdidas económicas por interrupción de los procesos productivos pueden llegar a ser muy altas.
- El costo de la estructura sismorresistente en una planta industrial es de orden menor en relación a los equipos que puede albergar.
- El volumen de personal y/o mano de obra, al trabajar bajo el riesgo intrínseco de algunas industrias, hacen necesaria una alta seguridad.
- Se debe proteger el medio si los productos trabajados son contaminantes.
- Se debe proteger la vida si los productos trabajados son explosivos o venenosos.

Entre las disposiciones de la Norma NCh 2369 Of. 2003, referidas a estanques verticales apoyados, se encuentran las siguientes:

- Los estanques deben ser analizados, considerando tanto la respuesta horizontal impulsiva, en la cual una porción del contenido vibra al unísono con la estructura, como la respuesta horizontal convectiva, asociada al oleaje en la superficie libre.
- Para efectos del cálculo de los períodos y masas participantes en los modos impulsivo, convectivo y vertical, se puede suponer que el estanque es infinitamente rígido.
- La determinación de las masas hidrodinámicas y los períodos asociados a los modos impulsivo y convectivo se debe hacer según lo especificado en las normas de diseño aceptadas, desarrolladas por las siguientes entidades: (American Petroleum Institute API), (American Waterworks Association AWWA), (New Zealand National Society for Earthquake Engineers NZ) y (American Concrete Institute ACI).
- El máximo valor a utilizar de modificación de la respuesta para estanques de acero corresponde a $R=4$.
- La aceleración espectral de diseño o coeficiente sísmico del modo impulsivo para la acción sísmica horizontal debe ser igual al coeficiente sísmico máximo indicado en la tabla 5.7 de esta norma (ver tabla 2.2) para una razón de amortiguamiento de 2% para el caso de estanques de acero (y 3% para estanques de hormigón). La aceleración espectral de diseño o coeficiente sísmico del modo convectivo para la acción sísmica horizontal debe ser determinado, considerando una razón de amortiguamiento de 0,5%, de acuerdo a la ecuación:

$$C = \frac{2,75 A_0}{gR} \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n \left(\frac{0,05}{\varepsilon} \right)^{0,4} > 0,1 \frac{A_0}{g} \quad (\text{Ec. 2.37})$$

- Si la norma de diseño empleada considera la acción vertical, el coeficiente sísmico vertical debe ser igual a 2/3 del coeficiente del modo impulsivo.

Tabla 2.2: Tabla 5.7 Nch 2369

| Tabla 5.7 - Valores máximos del coeficiente sísmico | | | |
|---|-------------------|--------------|--------------|
| R | $C_{\text{máx.}}$ | | |
| | $\xi = 0,02$ | $\xi = 0,03$ | $\xi = 0,05$ |
| 1 | 0,79 | 0,68 | 0,55 |
| 2 | 0,60 | 0,49 | 0,42 |
| 3 | 0,40 | 0,34 | 0,28 |
| 4 | 0,32 | 0,27 | 0,22 |
| 5 | 0,26 | 0,23 | 0,18 |

NOTA - Los valores indicados son válidos para la zona sísmica 3. Para las zonas sísmicas 2 y 1, los valores de esta tabla se deben multiplicar por 0,75 y 0,50, respectivamente.

El diseño debe considerar los coeficientes de importancia según la clasificación de estructuras y equipos especificada en la sección 4.3 de la norma.

2.7 Aplicación de modelo lineal para estanques de la industria

Los estudios del profesor Housner, son la base del trabajo desarrollado por Malhotra, Wenk y Wieland (2000). Este trabajo, llamado "Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks" entrega la base teórica para un diseño sísmico simplificado de estanques cilíndricos apoyados.

Como se ha indicado anteriormente, una parte del contenido del estanque se mueve con un período largo oscilando en la superficie (líquido convectivo), mientras que el resto se mueve rígidamente con las paredes del estanque (líquido impulsivo). Esta última experimenta la misma aceleración del suelo y contribuye predominantemente al corte basal y momento volcante. Ha sido mostrado (Veletsos et al., 1974, 1977, 1984) que la flexibilidad de las paredes del estanque causa que el líquido impulsivo experimente aceleraciones de varias veces el PGA. Luego, los cortes basales y los momentos volcantes calculados asumiendo estanques de paredes rígidas son poco conservadores.

A través de este análisis de carácter lineal, es posible estimar las tensiones en las paredes del estanque de acero inoxidable y evaluar su comportamiento frente a la falla de pandeo en el manto. Para esto se considera como tensión admisible la estipulada por la norma chilena oficial de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales (Nch2369 Of.2003), en su sección 11.7.4 donde indica que el manto se debe diseñar para que no haya pandeo local considerando el efecto de las fuerzas

laterales y verticales de diseño y las tolerancias de fabricación. Así, la tensión de compresión sobre el manto no debe exceder el menor de los valores siguientes:

$$F_a = 135F_y e/D \qquad F_a \leq 0,8F_y \qquad (Ec. 2.38)$$

Donde:

F_a : Tensión admisible en condición sísmica
 F_y : Tensión de fluencia
 e : Espesor
 D : Diámetro del manto

Esta fórmula está basada en expresiones de Timoshenko, corregidas Blume de acuerdo a sus observaciones del comportamiento de 12 chimeneas de 33 m a 52 m de altura en la Planta Huachipato, 3 de las cuales tuvieron fallas por pandeo local en los terremotos de Mayo de 1960. La tensión de falla recomendada, que considera los efectos de fabricación y montaje, es la siguiente:

$$F_u = 170F_y e/D \qquad (Ec. 2.39)$$

Si se aplican tensiones admisibles, el valor aceptable es $0,6 \cdot 1,33F_u = 0,8F_u$, lo que equivale a (Ec. 2.38)

El análisis desarrollado en este trabajo es lineal y se basa en los siguientes supuestos:

- 1) Estanque completamente anclado y de fundación rígida.
- 2) Representación del sistema tanque-líquido con sólo el primer modo impulsivo y el primer modo convectivo.
- 3) Agrupación de la mayor masa modal impulsiva con el primer modo impulsivo y de la mayor masa modal convectiva con el primer modo convectivo.
- 4) Ajuste de las alturas impulsivas y convectivas a considerar para el efecto volcane de los modos mayores.
- 5) Generalización de la fórmula del período impulsivo para hacerlo aplicable a estanques de acero y hormigón de varios espesores de manto.

La Figura 2.8 muestra un esquema del modelo, en el cual, para propósitos prácticos, sólo el primer modo convectivo e impulsivo son considerados. Para la mayoría de los estanques, específicamente aquellos cuya razón de esbeltez H/R (altura/radio) está entre 1/3 y 3, el primer modo convectivo y el primer modo impulsivo representan en conjunto entre el 85% y 98% de la masa del contenido del estanque.

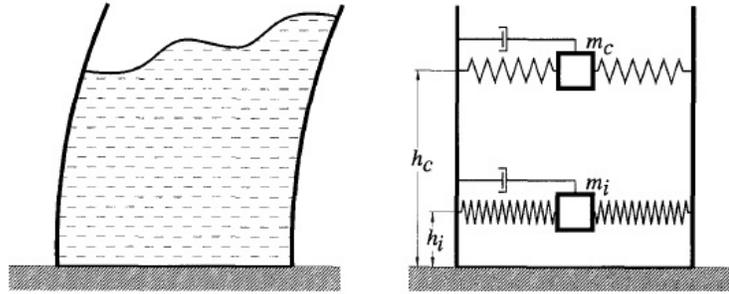


Figura 2.8: Esquema del modelo (Malhotra, 2000)

El esquema de la figura 2.8 representa un estanque modelado por un sistema generalizado de un grado de libertad en que m_c y h_c representan la masa convectiva y la altura en la que ésta actúa, mientras que m_i y h_i representan la masa impulsiva y la altura a la que ésta actúa.

Las propiedades del modelo son:

$$T_{imp} = C_i \cdot \frac{\sqrt{\rho \cdot H}}{\sqrt{h/R \cdot \sqrt{E}}} : \text{Período del modo impulsivo de vibración.}$$

$$T_{con} = C_c \cdot \sqrt{R} : \text{Período del modo convectivo de vibración.}$$

Donde:

H : Altura de diseño del contenido

R : Radio del estanque

h : Espesor uniforme equivalente del manto

ρ : Densidad del contenido

E : Módulo de elasticidad del material que conforma el manto del estanque

C_i, C_c : Coeficientes tabulados (Ver tabla 2.3)

Tabla 2.3: valores de diseño recomendados para los modos de vibración impulsivo y convectivo como función de la razón H/R

| H/R | C_i | C_c | mi/ml | mc/ml | hi/H | hc/H | hi'/H | hc'/H |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| 0,3 | 9,3 | 2,1 | 0,176 | 0,824 | 0,4 | 0,52 | 2,64 | 3,414 |
| 0,5 | 7,7 | 1,7 | 0,3 | 0,7 | 0,4 | 0,54 | 1,46 | 1,517 |
| 0,7 | 7 | 1,6 | 0,414 | 0,586 | 0,4 | 0,57 | 1,01 | 1,011 |
| 1 | 6,4 | 1,5 | 0,548 | 0,452 | 0,42 | 0,62 | 0,72 | 0,785 |
| 1,5 | 6,1 | 1,5 | 0,686 | 0,314 | 0,44 | 0,69 | 0,56 | 0,734 |
| 2 | 6,2 | 1,5 | 0,763 | 0,237 | 0,45 | 0,75 | 0,5 | 0,764 |
| 2,5 | 6,6 | 1,5 | 0,81 | 0,19 | 0,45 | 0,79 | 0,48 | 0,796 |
| 3 | 7 | 1,5 | 0,842 | 0,158 | 0,45 | 0,83 | 0,47 | 0,825 |

Las masas impulsiva y convectiva, como fracción de la masa total de líquido contenido en el estanque, se muestra en la figura 2.9:

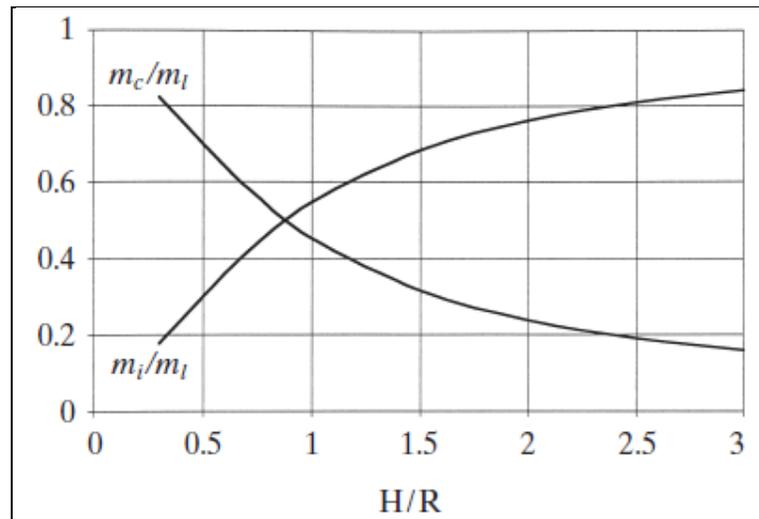


Figura 2.9: Masas impulsiva y convectiva como fracción de la masa total (Malhotra, 2000)

El momento neto inmediato sobre la base del estanque está dado por:

$$M = (m_i \cdot h_i + m_w \cdot h_w + m_r \cdot h_r) \cdot SA(T_{imp}) + m_c \cdot h_c \cdot SA(T_{con})$$

Mientras que el corte basal total está dado por:

$$Q = (m_i + m_w + m_r) \cdot SA(T_{imp}) + m_c \cdot SA(T_{con})$$

En que:

h_i : Altura del centro de gravedad de la presión hidrodinámica impulsiva

h_c : Altura del centro de gravedad de la presión hidrodinámica convectiva

h_w : Altura del centro de gravedad del manto del estanque

h_r : Altura del centro de gravedad del techo del estanque

m_i : Masa impulsiva

m_c : Masa convectiva

m_w : Masa de las paredes del estanque

m_r : Masa del techo del estanque

$SA(T_{imp})$: Aceleración espectral impulsiva (obtenida de espectro de respuesta elástica con amortiguamiento del 2%)

$SA(T_{con})$: Aceleración espectral convectiva (obtenida de espectro de respuesta elástica con amortiguamiento del 0,5%)

Capítulo 3 DESCRIPCIÓN DE DAÑOS

El terremoto del 27 de febrero de 2010 ha otorgado la posibilidad de observar las principales fallencias de los elementos que componen la industria del vino al momento de enfrentarse a un evento sísmico de gran magnitud, en este capítulo son descritas y organizadas estas fallencias.

3.1 Estanques Montados Sobre Patas

3.1.1 Descripción

Los estanques montados sobre patas son utilizados para el almacenamiento y fermentación de pequeños y medianos volúmenes de vino, de entre 5.000 y 60.000 litros.

Estos estanques, al igual que los apoyados, son de acero inoxidable, y su principal característica es el sistema de apoyo a fundación a través de patas. La Figura 3.1-1 muestra un ejemplar típico de estos estanques.



Figura 3.1-1: Estanque Montado Sobre Patas

Los estanques de acero inoxidable montados sobre patas observados en este trabajo no poseen una configuración única o estándar, las Figuras 3.1-2 a 3.1-7 muestran algunas de las diversas configuraciones vistas en terreno:



Figura 3.1-2: Estanque Montado Sobre Patas con Fondo Plano



Figura 3.1-3: Estanque Montado Sobre Patas con Fondo Cónico



Figura 3.1-4: Estanque Montado Sobre Patas con Sistema de Rigidización de Fondo



Figura 3.1-5: Estanque con Patas Soldadas al Fondo



Figura 3.1-6: Estanque con Patas Soldadas al Fondo y al Manto



Figura 3.1-7: Estanque con Pata Central

3.1.2 Fallas y daños

En este trabajo toma gran importancia el concepto de falla y el concepto de daño, ya que da luces acerca del tipo de comportamiento que puede considerarse aceptable, donde se espera un daño reparable y escasa o nula pérdida de contenido. Para caracterizar los comportamientos deficientes que no produjeron pérdidas se hablará de daño, por otro lado, se utilizará el concepto de falla para caracterizar todos aquellos comportamientos que derivaron en pérdidas de contenido o que por sus características representan un peligro para el personal de la industria. Esta diferenciación es importante, ya que muchos comportamientos deficientes sin pérdidas deben ser aceptados ya su eliminación está fuera de la factibilidad económica de la industria.

El terremoto del Maule dejó en evidencia el deficiente desempeño de muchos de los estanques montados sobre patas y sus sistemas de operación. Este desempeño deficiente se resume en las siguientes fallas y daños encontrados durante el proceso de levantamiento:

- 1) Pandeo de Patas
- 2) Desprendimiento de Patas
- 3) Punzonamiento
- 4) Volcamiento y deslizamiento
- 5) Colapso del manto por vaciado rápido

3.1.2.1 Pandeo de Patas

Este tipo de daño consiste en el pandeo o inestabilidad por esfuerzos de flexión o compresión, que sobrepasan los límites resistentes de las patas, dadas por sus características mecánicas y geométricas. En general este tipo de daño no está vinculado a una pérdida de contenido, sin embargo, en ocasiones se generaron volcamientos o roturas de cañerías como se observa en la parte inferior del estanque de la Figura 3.1-9.

Una estructura de pata típica es mostrada en la Figura 3.1-8, en esta se observa su geometría de hexaedro irregular en que $L1$ y $L2$ corresponden a los anchos de los extremos superior e inferior, $e1$ corresponde al espesor de la plancha de pata que en la mayoría de los casos era igual a 2 mm.

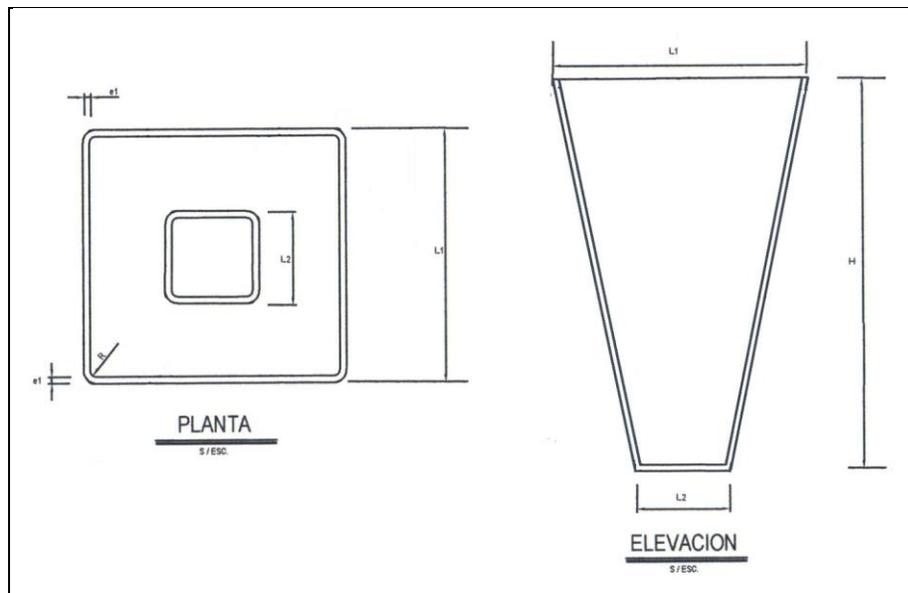


Figura 3.1-8: Estructura típica de pata

En la etapa de levantamiento, se observó una gran cantidad de estanques con este tipo de comportamiento, la Figura 3.1-9 muestra un colapso lateral por concentración de tensiones en la zona superior de las patas.



Figura 3.1-9: Colapso lateral de patas

Además, se pudo apreciar una enorme cantidad de casos en que se produjo el colapso lateral de la pata por una falla en el perno de regulación basal, en este caso la pata pudo o no verse afectada en su desarrollo longitudinal. Sin embargo, por producirse una rótula en la base, este tipo de daño aumenta la posibilidad de volcamiento del estanque. La Figura 3.1-10 muestra una base rotulada, mientras que la Figura 3.1-11 muestra un efecto de doble rótula en las zonas donde el momento flector es máximo a lo largo de la pata. Se observaron también daños severos en los que la pata fue comprimida en su totalidad colapsándose el estanque, la Figura 3.1-12 muestra este tipo de evento en que además se ven dañados los sistemas de operación como válvulas, tuberías o portalones.



Figura 3.1-10: Falla en perno de regulación



Figura 3.1-11: Formación de doble rótula



Figura 3.1-12: Pandeo severo

3.1.2.2 Desprendimiento de Patas

Este tipo de daño consiste en la separación entre la pata y el cuerpo del estanque, básicamente debido a una soldadura ineficiente entre los elementos. En general este tipo de daño no estaba vinculado a una pérdida de contenido de manera directa, sin embargo, su ocurrencia genera volcamientos o caídas con posibles resultados de fallas. Las Figura 3.1-13 muestra un desprendimiento sin daño de la pata, lo que indica un desprendimiento temprano sin liberación de energía por deformación de la pata; la Figura 3.1-14 muestra un estanque cuyas patas se deformaron antes de desprenderse, lo que indica una mejor calidad de soldadura con respecto a la de la Figura 3.1-13. En la Figura 3.1-15 se observa una práctica constructiva muy deficiente

en que la soldadura se realiza sobre un envigado con una zona de contacto muy pequeña e irregular; es posible notar la facilidad con que se desprendieron las patas en el estanque de la figura.



Figura 3.1-13: Desprendimiento de patas



Figura 3.1-14: Desprendimiento de patas



Figura 3.1-15: Desprendimiento de patas

3.1.2.3 Punzonamiento

Este tipo de daño consiste en la penetración de las patas en el cuerpo del estanque. Se debe al uso de una pata, cuya característica intrínseca de perfil cerrado la hace ser muy rígida con respecto a la base o manto a la cual se une. Este tipo de daño se encontró principalmente en los estanques con patas soldadas al fondo o estanques con patas soldadas al fondo y al manto y se vio en la gran mayoría de los casos asociada a pérdida de contenido, por lo que es considerado una falla. La Figura 3.1-16 muestra el punzonamiento en un estanque con patas soldadas tanto al fondo como al manto; la Figura 3.1-17 muestra un estanque afectado por punzonamiento cuyas patas se encontraban soldadas sólo al fondo.



Figura 3.1-16: Estanque afectado por punzonamiento



Figura 3.1-17: Estanque afectado por punzonamiento

3.1.2.3 Deslizamiento y Volcamiento

Ambos comportamientos fueron encontrados durante la etapa de levantamiento de daños. Ocurre únicamente en estanques que no cuentan con anclajes, y que por esta razón se encuentran libres de moverse tanto vertical como horizontalmente. Se observó colapso de estanques por deslizamiento hasta irregularidades del radier, como canaletas o dilataciones, con resultados de caída; y se observaron estanques simplemente volcados por la acción sísmica. Ambos casos provocan impactos que producen daños al manto o a las válvulas y tuberías con la consiguiente pérdida de

contenido. La Figura 3.1-18 muestra una canaleta sin rejilla en cuya vecindad se encuentran emplazados varios estanques sin anclar, situación que representa una mala práctica, pues se observaron fallas originadas por caídas en canaleta.



Figura 3.1-18: Canaleta sin rejilla

3.1.2.3 Colapso por Vaciado Rápido

Esta falla consiste en una deformación severa del manto por grandes esfuerzos generados en el interior del estanque, debido al escape rápido del contenido y la aparición de presiones negativas o succión. Este efecto es mostrado en la Figura 3.1-19.



Figura 3.1-19: Colapso por vaciado rápido

Fue posible observar gran cantidad de estanques con este tipo de falla, debido a que está asociada a fracturas en zona de portalones y válvulas, al desprendimiento del fondo del estanque o rotura de éste por punzonamiento y/o eventualmente a fisuras del manto o rotura de cañerías por efectos del pandeo global.

3.2 Estanques de Apoyo Continuo

3.2.1 Descripción

Los estanques de apoyo continuo son utilizados para el almacenamiento y fermentación de grandes volúmenes de vino, que llegan hasta los 650.000 litros. La mayor parte de los estanques están en el rango de 40.000 a 60.000 litros (Barros, 2007), y almacenan casi exclusivamente vino tinto.

Estos estanques pueden ser de acero inoxidable o de hormigón armado, aunque sólo un pequeño porcentaje de vino se procesa en éstos últimos, siendo las viñas más antiguas las que poseen un porcentaje mayor de estos estanques. Las Figuras 3.2-1 y 3.2-2 muestran ejemplares típicos de estos estanques.



Figura 3.2-1: Estanques de apoyo continuo (acero inoxidable)



Figura 3.2-2: Estanques de apoyo continuo (hormigón armado)

Los estanques de acero inoxidable apoyados observados en este trabajo pueden ser clasificados en 5 grupos:

- 1) **Simplemente apoyados:** No poseen sistema alguno que impida los desplazamientos debido a cualquier tipo de sollicitación. Sólo basan su resistencia al deslizamiento y al levantamiento en la fricción del fondo del estanque con la superficie de apoyo y el peso del estanque y su contenido, respectivamente.
- 2) **Apoyados con sistema de tope:** Poseen un sistema de topes laterales, distribuidos en el perímetro basal del estanque, que impiden los desplazamientos horizontales.
- 3) **Apoyados con sistema de anclaje:** Poseen un sistema de anclaje que impide los desplazamientos tanto horizontales como verticales.
- 4) **Apoyados con sistema de falda:** Poseen un enfalde que impide los desplazamientos horizontales.

5) **Apoyados con sistema de falda anclada:** Poseen un enfalde anclado a fundación que impide desplazamientos horizontales y verticales.

Las faldas, ancladas o no, se encontraron en dos configuraciones distintas: falda soldada a virola inferior y falda de prolongación del manto. Éstas serán descritas en más detalle en el punto 3.3.

Los sistemas de anclaje se pueden clasificar en 2 tipos fundamentales:

- Silla de anclaje
- Plancha de anclaje

El sistema de silla de anclaje consta de varias placas de acero, generalmente de dimensiones del orden de 300 mm de ancho, 250 mm de alto y 5 mm de espesor, que se sueldan a la virola inferior y se unen a la fundación mediante pernos. Existen diversas configuraciones para este tipo de anclaje, algunas de éstas son mostradas en las Figuras 3.2-3 a 3.2-7:



Figura 3.2-3: Silla de anclaje 3 placas



Figura 3.2-4: Silla de anclaje en L



Figura 3.2-5: Silla de anclaje 2 placas



Figura 3.2-6: Silla de anclaje en L enganchada



Figura 3.2-7: Silla de anclaje en L con atiesador

La plancha de anclaje consta de una virola que mide generalmente 200 mm de alto cuyo espesor es igual al de la virola inferior, la cual rodea a la fundación de hormigón. Cuando está anclada, esta plancha se encuentra unida a la fundación mediante huinchas de acero generalmente de 100 mm de ancho, 300 mm de alto y 5 mm de espesor, que se unen a la plancha mediante soldadura y a la fundación mediante pernos de corte o de tracción, o mediante ganchos tipo omega. La Figura 3.2-8 muestra una plancha anclada mediante pernos de corte.



Figura 3.2-8: Plancha de anclaje

Los estanques apoyados se encuentran emplazados sobre dos tipos principales de fundación, las que son llamadas losa (Figura 3.2-9) y torta (Figura 3.2-10). Generalmente los estanques emplazados sobre losa pertenecen a los grupos 1), 2) y 3), mientras que los estanques emplazados sobre torta pertenecen a los grupos 4) y 5).



Figura 3.2-9: Estanque emplazado sobre losa.



Figura 3.2-10: Estanques emplazados sobre tortas.

3.2.2 Fallas y daños

Como se indicó anteriormente, para caracterizar los comportamientos deficientes que no produjeron pérdidas se hablará de daño, por otro lado, se utilizará el concepto de falla para caracterizar todos aquellos comportamientos que derivaron en pérdidas de contenido o que por sus características representan un peligro para el personal de la industria

El terremoto del Maule dejó en evidencia el deficiente desempeño de muchos de los estanques de apoyo continuo y sus sistemas de operación. Este desempeño deficiente se resume en las siguientes fallas y daños encontrados durante el proceso de levantamiento de daños:

- Fallas y daños en estanques de acero inoxidable:
 - 1) Pandeo local del manto en zona de anclajes
 - 2) Pandeo global del manto
 - 3) Fallas y daños en anclajes
 - 4) Desprendimiento de fondo
 - 5) Volcamiento
 - 6) Colapso del manto por vaciado rápido
 - 7) Fractura en zona de portalones y válvulas

- Fallas y daños en estanques de hormigón armado:
 - 1) Grietas de corte
 - 2) Grietas de flexión
 - 3) Fallas y daños en fundación

3.2.2.1 Pandeo local del manto en zona de anclajes

Este tipo de evento, conocido también como punta adiamantada, consiste en el pandeo del manto localizado en las vecindades de los anclajes debido a la gran rigidez de estos en comparación con la del manto, lo que se traduce en una alta concentración de tensiones. Este tipo de falla, en general, produjo pérdidas considerables de contenido. La Figura 3.2-11 muestra una configuración de anclajes que incluye un anillo rigidizador, mientras que la Figura 3.2-12 muestra una configuración de anclajes individuales, más común. Es posible observar que el daño es mayor en la configuración de anclajes individuales.



Figura 3.2-11: Pandeo punta adiamantada, anclajes con anillo rigidizador



Figura 3.2-12: Pandeo punta adiamantada, anclajes individuales

3.2.2.2 Pandeo global del manto

Este evento se produce básicamente por un espesor insuficiente en la estructura del manto, que no soporta los esfuerzos de compresión. Se desarrolla principalmente en las zonas inferiores del cuerpo del estanque. La Figura 3.2-13 muestra un pandeo global simple (1 pliegue), mientras que la Figura 3.2-14 muestra un pandeo global severo múltiple, con formación de varios pliegues. Grandes esfuerzos axiales de compresión sobre la pared del estanque ocasionan el daño o falla por pandeo también conocida como “pata de elefante”, la cual puede provocar fisuras, fallas de soldaduras, fractura en las cañerías o incluso el colapso total de la estructura. Esta se observó principalmente en las zonas inferiores de estanques con y sin anclaje, pero más frecuentemente en estos últimos. También es posible encontrarlo en zonas más altas, donde se producen cambios de espesor entre las virolas.



Figura 3.2-13: Pandeo global simple



Figura 3.2-14: Pandeo global múltiple severo

3.2.2.3 Fallas y daños en anclajes

Se observó que los anclajes constituyen un elemento clave en el comportamiento de los estanques. Entre las fallas y daños que se observaron se encuentra el largo deficiente de los pernos de anclaje (Figura 3.2-15), la instalación muy cercana a los bordes del bloque de hormigón (Figura 3.2-16) o recubrimiento insuficiente, o insuficiencia en la capacidad del hormigón de fundación causada por falta de control de la mezcla de hormigón o por la deficiencia o ausencia total de armadura, entre otras. La mala instalación y diseño de anclaje trae como consecuencia la aparición de la punta de diamante y también el levantamiento de la base, lo que puede ocasionar rotura de las conexiones de las tuberías que salen del estanque debido a los desplazamientos verticales, o rotura de la unión de la placa de fondo con el manto del estanque, ambos con consecuencias de pérdidas considerables.



Figura 3.2-15: Largo insuficiente de pernos



Figura 3.2-16: Instalación muy cercana a los bordes.

Las fallas típicas para el caso de los elementos de anclaje son las siguientes:

3.2.2.3.1 Largo insuficiente de los pernos de anclaje

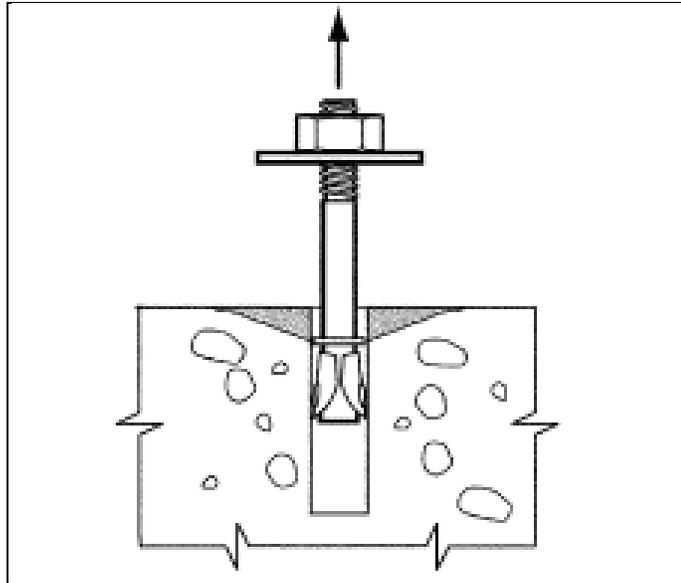


Figura 3.2-17: Esquema arrancamiento de perno (ACI, 2008)

En estos casos, como se ilustra en la Figura 3.2-17, ocurre una falla del anclaje por escape del perno, cuya penetración en el hormigón de fundación es insuficiente. Un ejemplo de esta falla observado en terreno fue mostrado en la Figura 3.2-15.

3.2.2.3.2 Instalación muy cercana a los bordes del bloque de hormigón

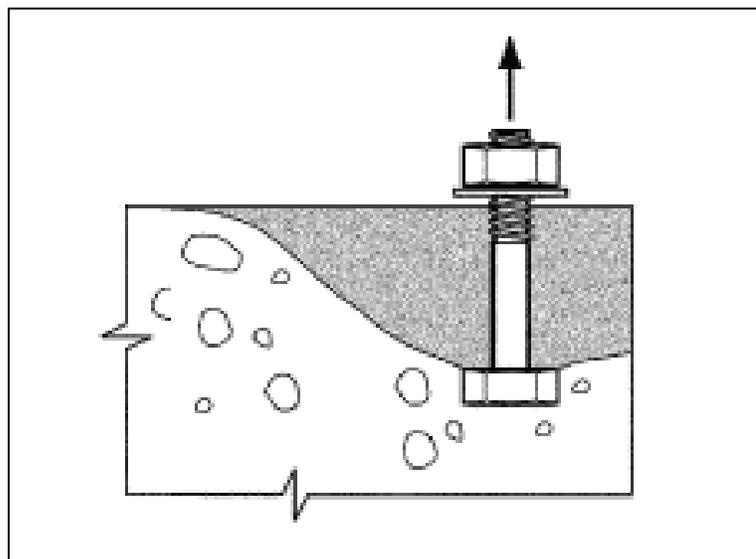


Figura 3.2-18: Esquema rotura lateral de fundación (ACI, 2008)

En estos casos, se produjo el desprendimiento de la zona lateral de la fundación, con el consiguiente escape del perno. Este fenómeno, ilustrado en la Figura 3.2-18, puede deberse tanto a una mala práctica en la instalación del anclaje, como a una mala construcción de la fundación, ya que ésta debería contar con acero de confinamiento, lo que no se vio en la mayoría de las bodegas. La Figura 3.2-19 muestra un ejemplo de este tipo de falla observado en terreno.



Figura 3.2-19: Rotura lateral de fundación

3.2.2.3.3 Insuficiencia en la capacidad del hormigón de fundación

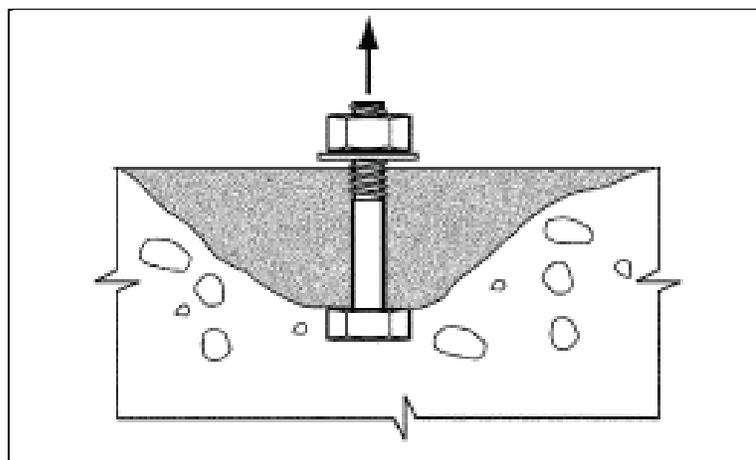


Figura 3.2-20: Esquema falla de hormigón de fundación (ACI, 2008)

Se observó también gran cantidad de daños asociados al hormigón de fundación y su calidad. Es necesario integrar el buen diseño de anclajes con un buen diseño de

fundación, que cuente con armadura adecuada en cuantía y ubicación. La Figura 3.2-20 ilustra este tipo de falla y la Figura 3.2-21 muestra esta falla observada en terreno.



Figura 3.2-21: Falla de hormigón de fundación

3.2.2.3.4 Corrosión

La corrosión de los materiales, tanto acero como hormigón (en este último caso, se produce una penetración del dióxido de carbono atmosférico a través de los poros, lo cual neutraliza la alcalinidad), facilita las fallas por arrancamiento e incluso la rotura del perno. La Figura 3.2-22 muestra un ejemplo de los efectos de la corrosión encontrados en el levantamiento de daños debido al terremoto.



Figura 3.2-22: Corrosión en anclajes

3.2.2.4 Desprendimiento de fondo

Esta falla puede ser producida por deficiencia en las soldaduras o por malas prácticas de diseño, en particular en los estanques con faldas. La Figura 3.2-23 muestra el fondo de un estanque con falla en todo el perímetro. Esta falla ocurre cuando el sistema permite desplazamientos verticales por sobre cierto límite, a partir del cual se desprende el fondo del estanque debido al continuo proceso de “martilleo” o efecto pistón del estanque contra la fundación durante la sollicitación sísmica.



Figura 3.2-23: desprendimiento de fondo

3.2.2.5 Volcamiento

Esta falla se genera principalmente en los estanques que se encuentran desprovistos de algún tipo de sistema de tope o anclaje, o que tienen un anclaje deficiente, de tal forma que no existe una resistencia suficiente al volcamiento y/o al deslizamiento, la que queda suministrada solamente por el peso del estanque y una porción de su contenido. Esta falla es la más crítica de todas, pues en la mayoría de los casos produce fugas de contenido, daños severos al estanque, daños a las estructuras y estanques aledaños y alto riesgo para el personal en las inmediaciones. La Figura 3.2-24 muestra un estanque apoyado volcado.



Figura 3.2-24: Estanque volcado

3.2.2.6 Colapso del manto por vaciado rápido

Esta falla consiste en una deformación severa del manto por grandes esfuerzos generados en el interior del estanque, debido al escape rápido del contenido y la aparición de presiones negativas o succión. Este efecto es mostrado en las Figuras 3.2-25 y 3.2-26.

Fue posible observar gran cantidad de estanques con este tipo de falla, debido a que está asociada a distorsiones angulares de los portalones o mal cierre de éstos, fracturas en zona de portalones y válvulas, desprendimiento del fondo del estanque y/o eventualmente a fisuras del manto o rotura de cañerías por efectos del pandeo global.



Figura 3.2-25: Falla de manto por succión



Figura 3.2-26: Falla de manto por succión

3.2.2.7 Fractura en zona de portalones y válvulas

La fractura en este tipo de elementos se inicia por una falla en la soldadura, la cual no soporta las solicitaciones generadas, o bien cede ante impactos. Esta falla es crítica, pues causa la fuga total del contenido, lo que genera además colapso por vaciado rápido. Esta falla tiene su origen, en general, en las zonas de soldadura, que se ven afectadas por grandes impactos o grandes esfuerzos. La Figura 3.2-27 muestra una rasgadura iniciada en la zona de soldadura de portalón. La Figura 3.2-28 muestra la falla en la soldadura de la zona inferior de portalón, que fue generada por impactos del estanque con la fundación debido a aceleraciones verticales. La Figura 3.2-29 muestra la rotura de una válvula en la zona de junta con el estanque, esta rotura es causada por impactos de origen similar a la falla de la Figura 3.2-28.



Figura 3.2-27: Falla en zona de portalón



Figura 3.2-28: Falla en soldadura inferior de portalón



Figura 3.2-29: Falla en soldadura de válvula

3.2.2.7 Grietas de flexión

El desempeño de la mayoría de los estanques de hormigón armado frente a las solicitaciones sísmicas fue adecuado, y la pérdida de vino asociada a las fallas en este tipo de estanques fue mínima. Sin embargo, se encontraron casos de fugas de contenido a través de grietas de flexión horizontales, las que aparecieron principalmente en las zonas de juntas de hormigonado, que son áreas débiles en las estructuras, vulnerables a filtraciones (las que pueden dañar las armaduras de refuerzo). La resistencia en estas zonas es bastante menor a la del hormigón sólido monolítico, sobre todo cuando se trata de enfrentarse a un sismo. Algunas grietas por flexión son mostradas en la figura 3.2-30.



Figura 3.2-30: Falla en pared de estanque de hormigón por esfuerzos de flexión

3.2.2.8 Grietas de corte

También fue posible encontrar algunos casos puntuales de grietas diagonales de corte, las que son mostradas en la Figura 3.2-31.



Figura 3.2-31: Falla en pared de estanque de hormigón por esfuerzos de corte

3.2.2.9 Fallas y daños en fundación

Se encontró además una serie de desempeños deficientes en las fundaciones de los estanques de hormigón armado, los que no causaron problemas de pérdidas. Sin embargo, es importante tener en consideración los potenciales problemas que pueden ser causados por fallas en fundaciones, como asentamientos diferenciales o volcamientos. Este tipo de falla es mostrada en la Figura 3.2-32.



Figura 3.2-32: Falla de fundación

3.3 Soluciones básicas y recomendaciones

En términos generales se observó un desempeño adecuado de los estanques de hormigón armado. La principal falla encontrada en éstos corresponde a la fuga de contenido por grietas horizontales las que fueron encontradas específicamente en la zona de juntas. Para mejorar el comportamiento de las juntas, el diseño y ejecución debe seguir las indicaciones estipuladas en el Anexo H, puntos H.4 y H.5 de la NCh170 Of.85 “Hormigón-Requisitos Generales” (INN, 1985). Las grietas de corte son evitables a partir del control de tensiones en el hormigón disponiendo una cuantía suficiente de armadura de corte en las paredes del estanque.

Los asentamientos de suelo traen como consecuencia fallas en los radiers y fundaciones, este tipo de eventos no produjeron pérdidas considerables, pero representan un potencial problema, que tiene solución a partir de una mejora en las planificaciones de emplazamiento, lo cual incluye estudios de mecánica de suelos.

En términos generales se observó desempeño más pobre en los estanques de acero inoxidable apoyados. Entre los daños más recurrentes se encuentran el pandeo de punta adiamantada en estanques con anclajes o con topes, pandeo pata de elefante, colapso del manto debido al vaciado rápido y fallas en los sistemas de anclajes. La fuga de contenido que se vincula a estas fallas, tanto parcial como total, indica que es necesario mejorar las metodologías de diseño, fabricación, instalación y uso de los estanques, de tal forma que se eviten pérdidas.

Se observó que, en general, los estanques de acero inoxidable anclados sufrieron menos daños que aquellos sin anclaje, lo que indica la necesidad de proveer a cada estanque de un buen sistema de anclaje. Se habla de buen sistema de anclaje, ya que, aún siendo menores los daños en estanques anclados, estos daños son numerosos y de diversos tipos, todos con origen en una mala instalación, práctica constructiva o diseño.

Los sistemas de anclaje, por consiguiente, deberán seguir métodos de diseño que tengan en consideración los daños y fallas revisados en la sección 4.2., es decir, todo anclaje deberá ser calculado con métodos de ingeniería que aseguren su buen funcionamiento; dichos métodos pueden ser los estipulados en el ACI349.2R, *Guide to the Concrete Capacity Design (CCD) Method -Embedment Design Example* (ACI, 2007), apéndices D y RD. En éstos se indican los requerimientos de diseño para resistencia nominal a tracción, resistencia a la ruptura del hormigón, resistencia al arrancamiento y resistencia a la ruptura lateral. Éstas disposiciones son también tratadas en el ACI318 2008 (ACI, 2008), apéndice D. El API Standard 650 (API, 2007), dispone también requerimientos mínimos para anclaje en la sección 5.12 y en el apéndice E, mientras que la NCh2369 Of.2003 (INN, 2003) indica también algunos

requerimientos que debiesen ser considerados en la sección 11.8.13. En resumen, los anclajes deben ser diseñados con fundamentos en la ingeniería estructural, condición que actualmente, según lo observado, no está siendo cumplida. Dada la importancia del ítem de anclajes extraída de este trabajo, se incluye en el anexo A de este trabajo, un procedimiento de diseño para anclajes.

Se observó además un mal funcionamiento de anclajes debido a las deficiencias y falta de metodologías adecuadas en el diseño de las bases, soportes o fundaciones, las que no poseen un cálculo de componentes básicos, como armaduras mínimas o grado de resistencia del hormigón. Por esto, se recomienda además, para conseguir un trabajo adecuado del anclaje, la construcción de fundaciones diseñadas de acuerdo a las condiciones de trabajo a que éstas estarán sometidas durante su vida útil. El diseño de fundaciones para estanques, es revisado en API Standard 650, Appendix B—Recommendations for Design and Construction of Foundations for Aboveground Oil Storage Tanks (API, 2007). El ACI318 2008 en su apéndice D indica algunas armaduras para reforzar las zonas de anclajes, las que deben ser consideradas en el diseño de fundaciones.

Para evitar el desprendimiento de fondo es recomendable darle mayor rigidez a la parte inferior del estanque de modo que no ocurran separaciones entre la base del estanque y la fundación de hormigón, logrando de esta forma anular los impactos entre ambos.

Este desprendimiento de fondo es mucho más recurrente cuando la falda corresponde a una extensión de la primera virola (virola inferior) y el fondo se encuentra soldado a ésta por su superficie interior (Figura 3.3-1). Una solución más segura (Costa, 2011) sería soldar la falda a la superficie exterior de la primera virola, la que a su vez se encuentra alineada y soldada a la base del estanque (Figura 3.3-2). Con esto se evita darle toda la responsabilidad de la unión fondo-manto a un perímetro soldado que evidentemente no resistirá bien los posibles impactos.

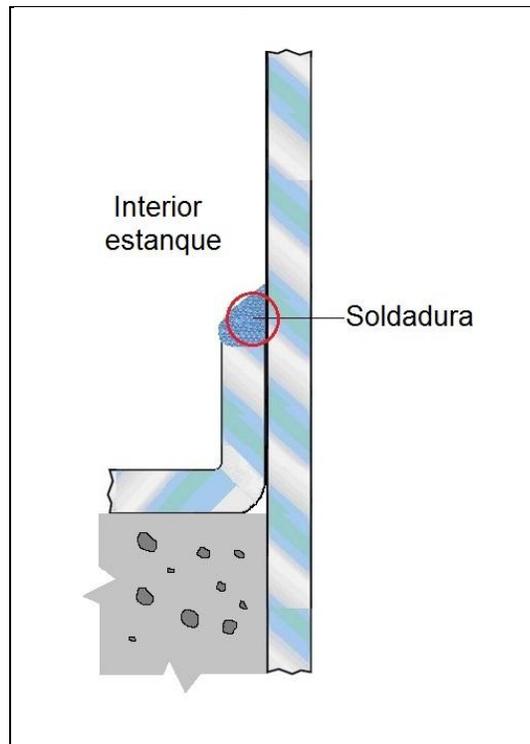


Figura 3.3-1: Práctica de enfaldeo deficiente

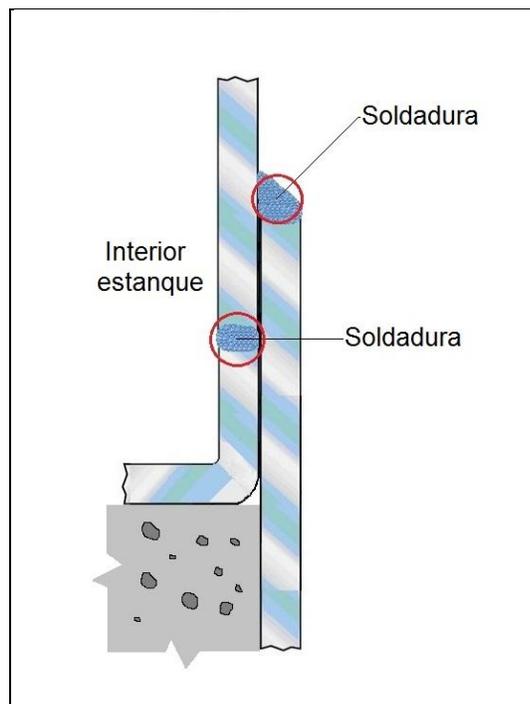


Figura 3.3-2: Práctica de enfaldeo mejorada

Se observó que un sistema rigidizador en la zona de anclajes, del tipo anular muestra mejores resultados que los anclajes independientes, ya que distribuye las tensiones sobre el manto evitando la gran concentración en la zona del anclaje. Este

anillo de refuerzo debe ser soldado de manera continua al manto del estanque. Esto se muestra en la Figura 3.3-3.



Figura 3.3-3: A la izquierda: Anclajes individuales. A la derecha: Zona anclaje con sistema rigidizador.

Todas las faldas deben contar con anclaje, ya que los estanques enfaldados también se ven expuestos a volcamiento, tal como muestra la Figura 3.3-4



Figura 3.3-4: Falda no anclada

La falla de succión es evitable a través del control de las fallas de fractura de portalones y válvulas, de desprendimiento de fondo y de cualquier falla que genere escapes masivos de contenido, ya que frente a estos eventos masivos las válvulas de

seguridad, diseñadas para liberar presión, no dan abasto. Esto se puede lograr a través de las buenas prácticas y diseños de anclaje, discutidas anteriormente.

La concentración de tensiones puede ser reducida diseñando la ubicación de los anclajes de manera cuidadosa, sin dejar espacios muy grandes sin anclar. Un punto en que la gran mayoría de los estanques mostraron falencias fue también la separación de los anclajes, el API650 indica en su apéndice E que para estanques con diámetro menor a 15 metros, la distancia máxima entre anclajes no puede superar los 1,8 metros, situación que en general no se cumple, además se indica que los anclajes deben ir equiespaciados. La Figura 3.3-5 muestra una distribución de anclajes irregular, debido a que en el sector del portalón y válvulas no es posible instalar anclajes.



Figura 3.3-5: Distribución ineficiente de anclajes

Por último, el diseño y fabricación de estanques debe ser realizado por personal calificado, ya que como se observó, los estanques de diseño más artesanal fueron los más afectados.

En cuanto a estanques montados sobre patas es fuertemente recomendada la utilización del sistema de rigidización de fondo mostrado en la figura 3.1-4, ya que éste, al estar bien estructurado, evita la incrustación de patas en el estanque, además del desprendimiento de las mismas.

Para evitar la formación de rótulas en los sistemas de regulación de altura (figura 3.1-11) se recomienda la utilización de sistemas de rigidización (Costa, 2011) que permitan una unión rígida entre la pata y el perno.

Se observó en terreno que muchos estanques no estaban óptimamente regulados, en este sentido, se recomienda la nivelación con pernos utilizando la menor altura posible, disminuyendo la posibilidad de rotulación de la zona de regulación.

Se observó además que algunos estanques se encontraban provistos de perfiles metálicos a modo de arriostamiento entre patas como muestra la Figura 3.3-6, los estanques que contaban con estos perfiles demostraron tener un mejor comportamiento con respecto a otros estanques.



Figura 3.3-6: Estanques con patas arriostradas.

Capítulo 4 ANÁLISIS GRUPO DE ESTANQUES DE LA INDUSTRIA

A través de un análisis de carácter lineal (sección 2.7), es posible estimar las tensiones en las paredes del estanque de acero inoxidable de apoyo continuo y evaluar su comportamiento frente a la falla de pandeo en el manto. Para este análisis, se considerarán sólo estanques de apoyo continuo, ya que los estanques sobre patas no reúnen las condiciones para adaptarse a los supuestos en los que se basa la metodología.

Para la evaluación, se considera como tensión admisible la estipulada por la norma chilena oficial de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales (Nch2369 Of.2003), en su sección 11.7.4 donde indica que el manto se debe diseñar para que no haya pandeo local considerando el efecto de las fuerzas laterales y verticales de diseño y las tolerancias de fabricación. Así, la tensión de compresión sobre el manto no debe exceder el menor de los valores siguientes:

$$F_a = 135F_y e/D \quad F_a \leq 0,8F_y \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

- F_a : Tensión admisible en condición sísmica
- F_y : Tensión de fluencia
- e : Espesor
- D : Diámetro del manto

El API 650 indica también una tensión admisible para la compresión en las paredes del estanque, la cual está dada por las ecuaciones siguientes:

$$F_a = \begin{cases} 83 e/D & \text{si } GHD^2/e^2 \geq 44 \\ 83 e/2,5D + 7,5\sqrt{GH} & \text{si } GHD^2/e^2 < 44 \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

- F_a : Tensión admisible en condición sísmica
- G : Densidad específica
- e : Espesor
- D : Diámetro del manto

A continuación, se calcula la tensión para un estanque tipo, cuyas características son las siguientes:

Capacidad : 60.000 litros
 Altura : 5,20 metros
 Radio : 1,92 metros
 Espesor : 2,00 milímetros

Con esto, se tiene una razón de esbeltez:

$$H/R = 2,71$$

Con lo cual se tienen los siguientes valores para la tabla 2.3:

Tabla 4.1: Factores Tabla 2.3 ($H/R = 2,71$)

| | |
|-----------|-------|
| C_i | 6,76 |
| C_c | 1,48 |
| m_i/m_l | 0,823 |
| m_c/m_l | 0,176 |
| h_i/H | 0,452 |
| h_c/H | 0,807 |

Con estos valores, los períodos para los modos impulsivo y convectivo son los siguientes:

Tabla 4.2: Períodos Modales

| | | |
|-----------|-------|---|
| T_{imp} | 0,075 | s |
| T_{con} | 2,049 | s |

Para el espectro de diseño de la Norma Chilena NCh 2369 Of.2003, considerando un suelo tipo III, ubicado en la zona sísmica 3 y tomando un factor de reducción de la respuesta elástica de $R=1$, se obtienen las siguientes aceleraciones:

Tabla 4.3: Aceleraciones espectrales Nch2369 $R=1$, $\varepsilon_{imp}=2\%$, $\varepsilon_{conv}=0,5\%$

| | | |
|---------------|-------|---|
| $SA(T_{imp})$ | 0,790 | g |
| $SA(T_{con})$ | 0,187 | g |

Luego, para el estanque en consideración se tienen los siguientes valores:

Tabla 4.4: Datos Estanque

| | | |
|--------|---------|-------------------|
| H | 5,2 | m |
| R | 1,92 | m |
| e | 0,002 | m |
| ρ | 1.000 | kg/m ³ |
| E | 210.000 | MPa |

Tabla 4.5: Masas y Alturas para el modelo

| Masas | | |
|---------|--------|----|
| m_i | 49.419 | kg |
| m_c | 10.580 | kg |
| m_w | 1.001 | kg |
| m_r | 184 | kg |
| Alturas | | |
| h_i | 2,35 | m |
| h_c | 4,19 | m |
| h_w | 2,6 | m |
| h_r | 5,2 | m |

Con esto, el momento resultante es:

$$M = 1009 \text{ Kn} \cdot \text{m}$$

Aplicando la ecuación de Navier sobre el estanque, como muestra la figura 4.1-1:

$$\left(\sigma_{xx}(y) \right)_M = -\frac{M_z(x)y}{I_{zz}(x)} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

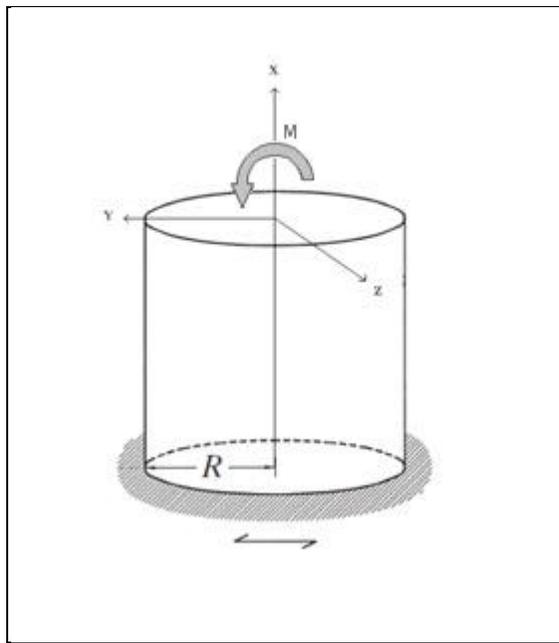


Figura 4.1-1: Modelo de aplicación de Ecuación de Navier

Y sabiendo que la inercia para sólidos cilíndricos es:

$$I_{ZZ} = \frac{\pi R^4}{4} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Se tiene que la inercia para el estanque corresponde a:

$$I_{ZZ} = \frac{\pi(R^4 - (R-e)^4)}{4} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Finalmente, la tensión sobre el manto es:

$$\sigma = 43,8 \text{ MPa}$$

Considerando como tensión admisible la estipulada por la norma Nch2369 Of.2003:

$$\sigma_a = \min \left(135 \cdot F_y \cdot \frac{e}{D}, 0,8 \cdot F_y \right)$$

Y considerando que el estanque ha sido fabricado en base a un acero 304L, se tiene:

Tabla 4.6: Tensiones de fluencia y admisible acero 304L

| | | |
|------------|------|-----|
| Fy | 210 | MPa |
| σ_a | 14,8 | MPa |

Finalmente, el factor de utilización σ/σ_a es del 296%.

Si consideramos el espectro de respuesta elástica de Curicó (N-S) correspondiente al terremoto del 27 de febrero de 2010, se obtienen las siguientes aceleraciones:

Tabla 4.7: Aceleraciones espectrales Curicó (N-S)

| | | |
|---------------|-------|---|
| $SA(T_{imp})$ | 0,875 | g |
| $SA(T_{con})$ | 0,203 | g |

Las que entregan los siguientes resultados:

$$M = 1160 \text{ Kn} \cdot \text{m}$$

$$\sigma = 48,4 \text{ MPa}$$

Con lo que el factor de utilización σ/σ_a es de 327%.

Este análisis simplificado indica que el diseño de este estanque no es lo suficientemente robusto para resistir sin daños los esfuerzos propios de un evento sísmico de grandes dimensiones.

La diferencia entre el límite de compresión para las paredes de los estanques de la norma chilena con respecto a la norteamericana es mostrada en la Figura 4.1-2. Mientras que la diferencia en el factor de utilización es mostrada en la Figura 4.1-3. Estos valores han sido obtenidos a partir del análisis lineal aplicado a 28 estanques (características geométricas en tabla 4.10 a 4.15) de apoyo continuo, y considerando como sismo aplicado, el promedio en dirección norte-sur (Figura 4.1-6). Como se observa, el límite a compresión impuesto por el API 650, es más conservador que el límite impuesto por la NCh 2369.

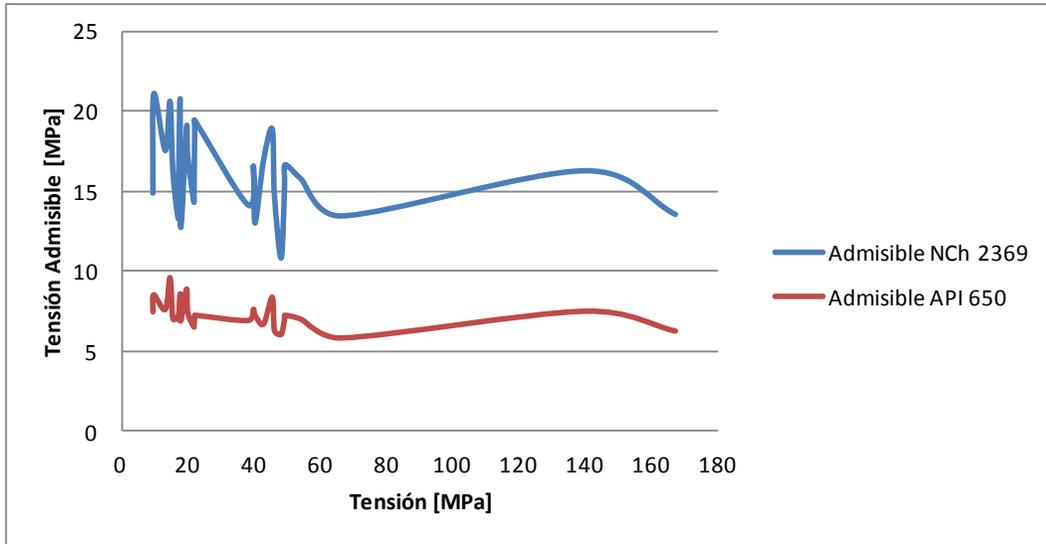


Figura 4.1-2: Tensiones Admisibles API650-NCh2369

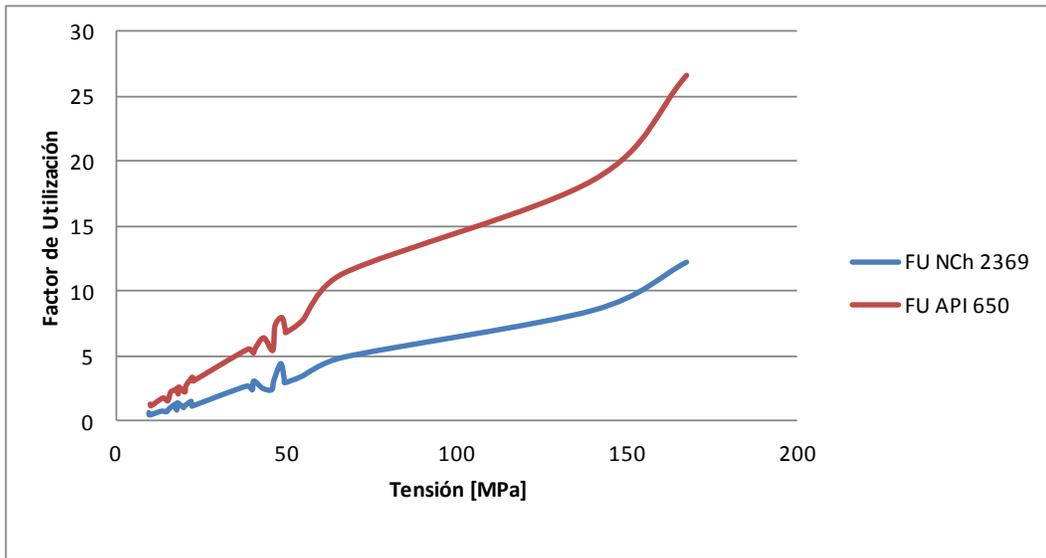


Figura 4.1-3: Factores de Utilización API650-NCh2369

Considerando los daños registrados a un grupo de 28 estanques de apoyo continuo, se aplica este método asumiendo que los estanques están completamente llenos, es decir, no existe el “sloshing” (modo de vibración superficial), por lo que se toma la totalidad del contenido como masa impulsiva.

Se calcularon las tensiones sobre las paredes de estos estanques considerando las acciones sísmicas siguientes, todas con razón de amortiguamiento de 2% (correspondiente al modo impulsivo):

- Espectro de diseño Nch2369, R=1.
- Espectro de diseño Nch2369, R=4.
- Espectro de respuesta elástica, Curicó (N-S).
- Espectro de respuesta elástica, Curicó (E-W).
- Espectro de respuesta elástica promedio: Curicó, Talca, Hualañé.

La figura 4.1-4 muestra los 4 primeros espectros de la lista:

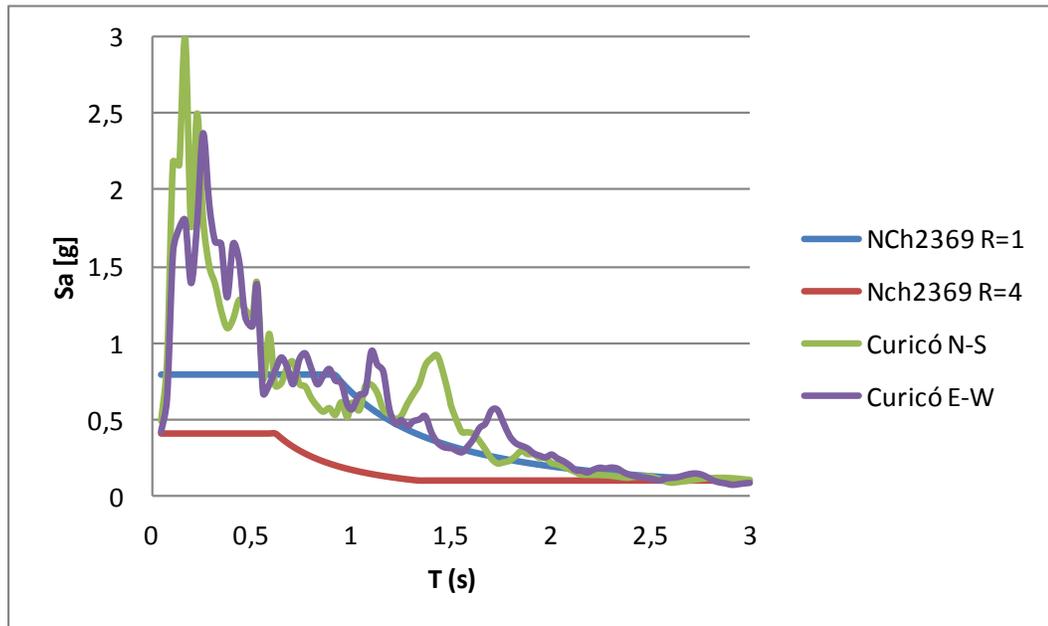


Figura 4.1-4: Espectros para análisis lineal

La figura 4.1-5 muestra la ubicación de las localidades consideradas para el espectro promedio.



Figura 4.1-5: Zonas de registro para espectro promedio (sil.gob.cl)

El espectro promedio es mostrado en las figuras 4.1-6 y 4.1-7:

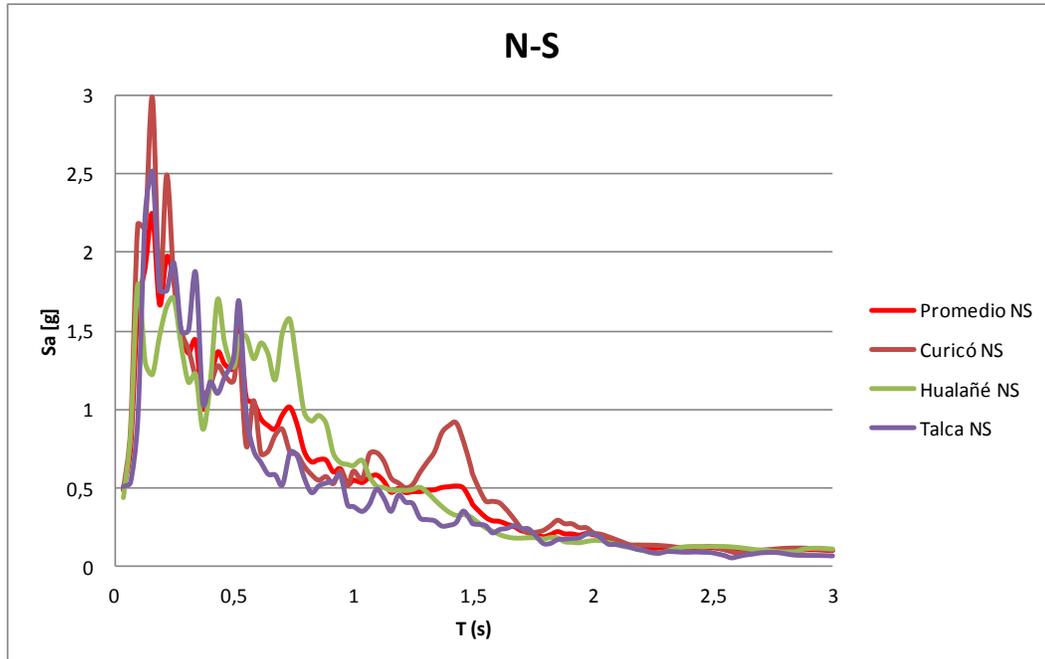


Figura 4.1-6: Espectro promedio N-S

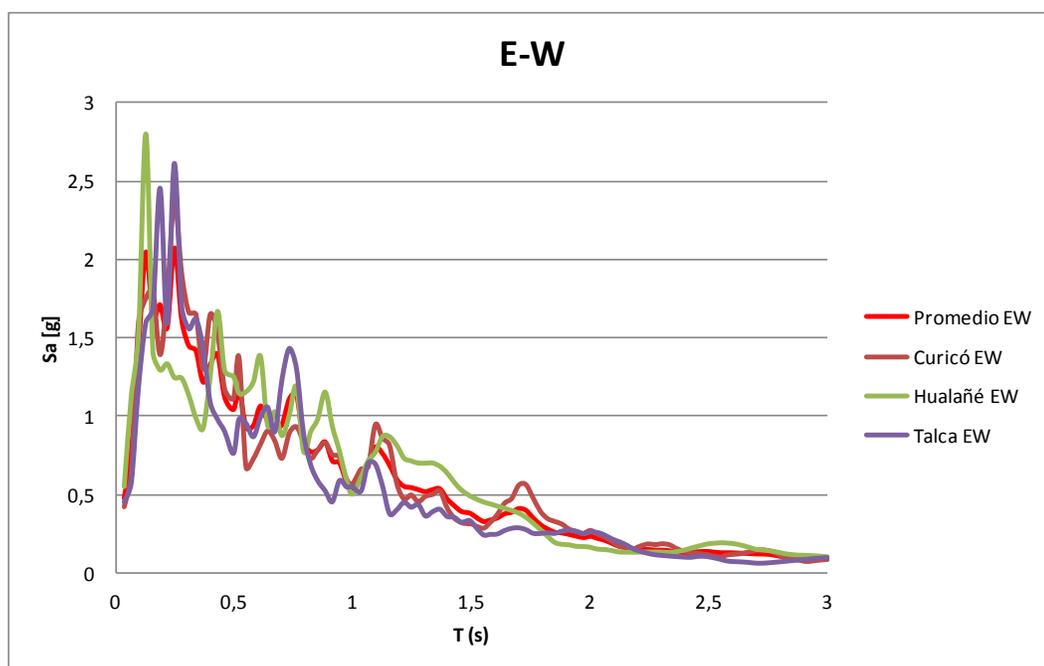


Figura 4.1-7: Espectro promedio E-W

Los 28 estanques, son clasificados según 3 colores de acuerdo al daño observado en terreno, tal como muestra la tabla 4.8:

Tabla 4.8: Clasificación para evaluación de daños

| | |
|--|--|
| | Estanque sin daño |
| | Estanque con daño moderado |
| | Estanque con falla, pérdida de contenido |

Para cada estanque se calculó la tensión admisible dada por la NCh2369 Of.2003 y se calculó la tensión sobre el manto siguiendo la metodología planteada por Malhotra, Wenk y Wielan (Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks, Malhotra, Wenk y Wieland, 2000), con lo cual se obtiene el factor de utilización asociado a cada estanque.

Para este análisis se ha omitido la tensión por componente vertical del sismo, ya que como se muestra en la tabla 4.9 estas tensiones son de órdenes de magnitud menores a las tensiones producidas por las componentes horizontales del sismo.

Las tablas 4.10 a 4.14 muestran los resultados obtenidos para:

- Espectro de diseño Nch2369, $R=1$. (Tabla 4.10)
- Espectro de diseño Nch2369, $R=4$. (Tabla 4.11)
- Espectro de respuesta elástica, Curicó (N-S). (Tabla 4.12)
- Espectro de respuesta elástica, Curicó (E-W). (Tabla 4.13)
- Espectro de respuesta elástica promedio (N-S). (Tabla 4.14)
- Espectro de respuesta elástica promedio (E-W). (Tabla 4.15)

Se entregan los resultados para mantos en acero 304L, el más utilizado en la industria vitivinícola para las estructuras de manto.

Tabla 4.9: Tensiones asociadas al espectro promedio vertical

| Espectro Promedio V | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----------|--------|----------|-------|--------|-----------|------------|--------|-----------|----------|-------------|----------------|------------------|---------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Esesor | Período T | Tipo Apoyo | Sa | Wpared | Wtecho | Fuerza Comp | Area | Tensión | Tensión |
| N° | (l) | (cm) | (cm) | (l) | (mm) | (seg) | | | Kg | Kg | N | m ² | N/m ² | Mpa |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | Losa | 0,4530 | 404,7497 | 90,6667 | 2199,5132 | 0,0169 | 130422,1314 | 0,1304 |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | Losa | 0,4530 | 572,5274 | 181,3333 | 3346,9357 | 0,0239 | 140301,5017 | 0,1403 |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | Torta | 0,4530 | 1396,9528 | 320,0000 | 7622,8010 | 0,0388 | 196442,4578 | 0,1964 |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | Torta | 0,4530 | 567,1169 | 130,7429 | 3098,3066 | 0,0203 | 152971,2554 | 0,1530 |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | Torta | 0,4530 | 962,3083 | 182,2222 | 5081,4026 | 0,0267 | 190095,5205 | 0,1901 |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | Torta | 0,4530 | 585,9703 | 131,4595 | 3185,1922 | 0,0198 | 160898,3986 | 0,1609 |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | Losa | 0,4530 | 1755,6337 | 378,4615 | 9474,7995 | 0,0422 | 224506,7756 | 0,2245 |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | Losa | 0,4530 | 725,9494 | 164,0000 | 3951,1320 | 0,0227 | 174166,7221 | 0,1742 |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | Torta | 0,4530 | 658,5573 | 106,6667 | 3397,3852 | 0,0183 | 185717,8852 | 0,1857 |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | Torta | 0,4530 | 669,4508 | 110,2222 | 3461,5349 | 0,0186 | 186145,5166 | 0,1861 |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | Losa | 0,4530 | 901,9591 | 181,8667 | 4811,8901 | 0,0251 | 192057,5398 | 0,1921 |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | Torta | 0,4530 | 1503,2701 | 444,4444 | 8647,3202 | 0,0418 | 207084,2272 | 0,2071 |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | Torta | 0,4530 | 1443,1664 | 426,6667 | 8301,5479 | 0,0401 | 207083,3385 | 0,2071 |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | Losa | 0,4530 | 850,3255 | 177,7778 | 4564,4974 | 0,0236 | 193245,8955 | 0,1932 |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | Losa | 1,3988 | 1593,3253 | 321,4545 | 26248,8870 | 0,0362 | 724868,3220 | 0,7249 |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | Torta | 0,4530 | 891,8509 | 195,5556 | 4827,7876 | 0,0248 | 194876,0114 | 0,1949 |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | Losa | 1,3988 | 2134,0104 | 380,9524 | 34476,5353 | 0,0423 | 814249,7142 | 0,8142 |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | Torta | 1,3988 | 840,7690 | 140,8000 | 13455,9040 | 0,0210 | 640171,2756 | 0,6402 |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | Torta | 1,3988 | 1504,0229 | 347,0769 | 25375,9252 | 0,0362 | 701876,6105 | 0,7019 |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | Losa | 1,3988 | 1600,1633 | 283,3333 | 25820,0387 | 0,0333 | 774522,1277 | 0,7745 |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | Losa | 1,3988 | 2945,8238 | 800,0000 | 51349,8746 | 0,0614 | 836707,8922 | 0,8367 |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | Torta | 1,3988 | 1001,3261 | 184,6154 | 16257,5580 | 0,0241 | 675418,7353 | 0,6754 |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | Losa | 1,3988 | 1735,7005 | 333,3333 | 28363,4887 | 0,0362 | 784379,2355 | 0,7844 |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | Losa | 1,3988 | 1778,5399 | 317,4603 | 28733,1593 | 0,0353 | 814235,9888 | 0,8142 |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | Losa | 1,0453 | 2945,4845 | 512,0000 | 35419,3928 | 0,0491 | 721498,8221 | 0,7215 |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | Torta | 1,3988 | 2455,0416 | 666,6667 | 42794,1462 | 0,0511 | 836694,1720 | 0,8367 |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | Losa | 1,3988 | 1266,0870 | 221,6708 | 20395,0263 | 0,0264 | 773218,0204 | 0,7732 |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | Losa | 1,0453 | 2454,8060 | 426,6667 | 29518,5744 | 0,0409 | 721488,5670 | 0,7215 |

Tabla 4.10: Resultados Espectro de diseño Nch2369, R=1

| Espectro de Diseño Nch2369 R=1 | | | | | | | | | | | Acero 304L | |
|--------------------------------|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|-----------------|------------|-------------------|----------------------|-------|------------|--|
| Estanque | Capacidad (L) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | H/R | Espesor (mm) | Período T (seg) | Tipo Apoyo | Tensión (σ) (Mpa) | Admisible (σa) (Mpa) | σ/σa | Daño | |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | Losa | 16,267 | 21,109 | 0,771 | | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | Losa | 15,860 | 14,926 | 1,063 | | |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | Torta | 24,387 | 20,642 | 1,181 | | |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | Torta | 22,006 | 17,578 | 1,252 | | |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | Torta | 29,415 | 20,809 | 1,414 | | |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | Torta | 25,816 | 16,232 | 1,590 | | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | Losa | 32,584 | 18,981 | 1,717 | | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | Losa | 28,637 | 15,695 | 1,825 | | |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | Torta | 36,699 | 19,461 | 1,886 | | |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | Torta | 36,684 | 19,145 | 1,916 | | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | Losa | 33,210 | 17,195 | 1,931 | | |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | Torta | 28,520 | 13,324 | 2,140 | | |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | Torta | 29,676 | 12,791 | 2,320 | | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | Losa | 36,348 | 15,075 | 2,411 | | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | Losa | 41,933 | 16,617 | 2,524 | | |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | Torta | 36,245 | 14,373 | 2,522 | | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | Losa | 47,906 | 18,919 | 2,532 | | |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | Torta | 45,125 | 16,939 | 2,664 | | |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | Torta | 40,255 | 14,182 | 2,838 | | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | Losa | 51,946 | 16,688 | 3,113 | | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | Losa | 42,452 | 13,055 | 3,252 | | |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | Torta | 48,603 | 14,793 | 3,286 | | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | Losa | 51,810 | 15,386 | 3,367 | | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | Losa | 57,177 | 15,766 | 3,627 | | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | Losa | 67,602 | 16,319 | 4,143 | | |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | Torta | 50,723 | 10,879 | 4,662 | | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | Losa | 69,804 | 13,500 | 5,171 | | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | Losa | 80,746 | 13,599 | 5,938 | | |

Tabla 4.11: Resultados Espectro de diseño Nch2369, R=4

| Espectro de Diseño Nch2369 R=4 | | | | | | | | | | | Acero 304L | | |
|--------------------------------|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|-----------------|------------|-------------------|----------------------|-------|------------|--|--|
| Estanque | Capacidad (L) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | H/R | Espesor (mm) | Periodo T (seg) | Tipo Apoyo | Tensión (σ) (Mpa) | Admisible (σa) (Mpa) | σ/σa | Daño | | |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | Losa | 8,237 | 21,109 | 0,390 | | | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | Losa | 8,030 | 14,926 | 0,538 | | | |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | Torta | 12,348 | 20,642 | 0,598 | | | |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | Torta | 11,142 | 17,578 | 0,634 | | | |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | Torta | 14,894 | 20,809 | 0,716 | | | |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | Torta | 13,071 | 16,232 | 0,805 | | | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | Losa | 16,498 | 18,981 | 0,869 | | | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | Losa | 14,500 | 15,695 | 0,924 | | | |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | Torta | 18,582 | 19,461 | 0,955 | | | |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | Torta | 18,574 | 19,145 | 0,970 | | | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | Losa | 16,815 | 17,195 | 0,978 | | | |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | Torta | 14,440 | 13,324 | 1,084 | | | |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | Torta | 15,026 | 12,791 | 1,175 | | | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | Losa | 18,404 | 15,075 | 1,221 | | | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | Losa | 21,232 | 16,617 | 1,278 | | | |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | Torta | 18,352 | 14,373 | 1,277 | | | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | Losa | 24,256 | 18,919 | 1,282 | | | |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | Torta | 22,848 | 16,939 | 1,349 | | | |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | Torta | 20,382 | 14,182 | 1,437 | | | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | Losa | 26,302 | 16,688 | 1,576 | | | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | Losa | 21,495 | 13,055 | 1,646 | | | |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | Torta | 24,609 | 14,793 | 1,664 | | | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | Losa | 26,233 | 15,386 | 1,705 | | | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | Losa | 28,951 | 15,766 | 1,836 | | | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | Losa | 34,229 | 16,319 | 2,097 | | | |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | Torta | 25,682 | 10,879 | 2,361 | | | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | Losa | 35,344 | 13,500 | 2,618 | | | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | Losa | 40,884 | 13,599 | 3,006 | | | |

Tabla 4.12: Resultados Espectro de respuesta elástica, Curicó (N-S)

| Espectro de Respuesta Elástica Curicó N-S | | | | | | | | | | | Acero 304L | |
|---|---------------|-------------|-------|---------------|-------------|-----------------|------------|-------------------|---------------------|--------|------------|--|
| Estanque | Capacidad (L) | Altura (cm) | H/R | Diámetro (cm) | Esesor (mm) | Período T (seg) | Tipo Apoyo | Tensión (σ) (Mpa) | Admisible (σ) (Mpa) | σ/σa | Daño | |
| 1 | 17000 | 300 | 2,234 | 269 | 2,0 | 0,034 | Losa | 10,024 | 21,109 | 0,475 | | |
| 2 | 34000 | 300 | 1,579 | 380 | 2,0 | 0,039 | Losa | 9,773 | 14,926 | 0,655 | | |
| 3 | 60000 | 450 | 2,184 | 412 | 3,0 | 0,052 | Torta | 15,027 | 20,642 | 0,728 | | |
| 4 | 28600 | 350 | 2,170 | 323 | 2,0 | 0,043 | Torta | 13,560 | 17,578 | 0,771 | | |
| 5 | 41000 | 450 | 2,642 | 341 | 2,5 | 0,054 | Torta | 18,126 | 20,809 | 0,871 | | |
| 6 | 32000 | 370 | 2,230 | 332 | 1,9 | 0,048 | Torta | 15,908 | 16,232 | 0,980 | | |
| 7 | 82000 | 520 | 2,321 | 448 | 3,0 | 0,063 | Losa | 20,078 | 18,981 | 1,058 | | |
| 8 | 41000 | 400 | 2,214 | 361 | 2,0 | 0,053 | Losa | 17,646 | 15,695 | 1,124 | | |
| 9 | 30000 | 450 | 3,089 | 291 | 2,0 | 0,059 | Torta | 22,614 | 19,461 | 1,162 | | |
| 10 | 31000 | 450 | 3,039 | 296 | 2,0 | 0,059 | Torta | 22,605 | 19,145 | 1,181 | | |
| 11 | 46500 | 450 | 2,481 | 363 | 2,2 | 0,058 | Losa | 20,464 | 17,195 | 1,190 | | |
| 12 | 100000 | 450 | 1,692 | 532 | 2,5 | 0,062 | Torta | 17,574 | 13,324 | 1,319 | | |
| 13 | 100000 | 450 | 1,692 | 532 | 2,4 | 0,063 | Torta | 18,286 | 12,791 | 1,430 | | |
| 14 | 50000 | 450 | 2,393 | 376 | 2,0 | 0,062 | Losa | 22,398 | 15,075 | 1,486 | | |
| 15 | 85000 | 550 | 2,480 | 444 | 2,6 | 0,073 | Losa | 46,466 | 16,617 | 2,796 | | |
| 16 | 55000 | 450 | 2,281 | 394 | 2,0 | 0,062 | Torta | 22,334 | 14,373 | 1,554 | | |
| 17 | 100000 | 630 | 2,803 | 450 | 3,0 | 0,081 | Losa | 53,085 | 18,919 | 2,806 | | |
| 18 | 44000 | 500 | 2,987 | 335 | 2,0 | 0,070 | Torta | 50,003 | 16,939 | 2,952 | | |
| 19 | 94000 | 520 | 2,168 | 480 | 2,4 | 0,072 | Torta | 44,606 | 14,182 | 3,145 | | |
| 20 | 85000 | 600 | 2,825 | 425 | 2,5 | 0,083 | Losa | 57,561 | 16,688 | 3,449 | | |
| 21 | 200000 | 600 | 1,842 | 651 | 3,0 | 0,084 | Losa | 47,041 | 13,055 | 3,603 | | |
| 22 | 60000 | 520 | 2,713 | 383 | 2,0 | 0,075 | Torta | 53,857 | 14,793 | 3,641 | | |
| 23 | 100000 | 600 | 2,605 | 461 | 2,5 | 0,084 | Losa | 57,411 | 15,386 | 3,731 | | |
| 24 | 100000 | 630 | 2,803 | 450 | 2,5 | 0,089 | Losa | 63,358 | 15,766 | 4,019 | | |
| 25 | 160000 | 750 | 2,878 | 521 | 3,0 | 0,105 | Losa | 186,461 | 16,319 | 11,426 | | |
| 26 | 200000 | 600 | 1,842 | 651 | 2,5 | 0,092 | Torta | 56,206 | 10,879 | 5,166 | | |
| 27 | 90000 | 600 | 2,857 | 420 | 2,0 | 0,093 | Losa | 77,350 | 13,500 | 5,730 | | |
| 28 | 160000 | 750 | 2,878 | 521 | 2,5 | 0,116 | Losa | 222,716 | 13,599 | 16,377 | | |

Tabla 4.13: Resultados Espectro de respuesta elástica, Curicó (E-W)

| Espectro de Respuesta Elástica Curicó E-W | | | | | | | | | | Acero 304L | | |
|---|---------------|-------------|---------------|---------|--------------|-----------------|------------|-------------------|----------------------|------------|------|--|
| Estanque | Capacidad (l) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | H/R (l) | Espesor (mm) | Período T (seg) | Tipo Apoyo | Tensión (σ) (Mpa) | Admisible (σa) (Mpa) | σ/σa | Daño | |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | Losa | 8,651 | 21,109 | 0,410 | | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | Losa | 8,434 | 14,926 | 0,565 | | |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | Torta | 12,968 | 20,642 | 0,628 | | |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | Torta | 11,702 | 17,578 | 0,666 | | |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | Torta | 15,642 | 20,809 | 0,752 | | |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | Torta | 13,728 | 16,232 | 0,846 | | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | Losa | 17,327 | 18,981 | 0,913 | | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | Losa | 15,228 | 15,695 | 0,970 | | |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | Torta | 19,516 | 19,461 | 1,003 | | |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | Torta | 19,508 | 19,145 | 1,019 | | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | Losa | 17,660 | 17,195 | 1,027 | | |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | Torta | 15,166 | 13,324 | 1,138 | | |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | Torta | 15,781 | 12,791 | 1,234 | | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | Losa | 19,329 | 15,075 | 1,282 | | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | Losa | 33,817 | 16,617 | 2,035 | | |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | Torta | 19,274 | 14,373 | 1,341 | | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | Losa | 38,634 | 18,919 | 2,042 | | |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | Torta | 36,391 | 16,939 | 2,148 | | |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | Torta | 32,464 | 14,182 | 2,289 | | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | Losa | 41,892 | 16,688 | 2,510 | | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | Losa | 34,235 | 13,055 | 2,622 | | |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | Torta | 39,196 | 14,793 | 2,650 | | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | Losa | 41,782 | 15,386 | 2,716 | | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | Losa | 46,111 | 15,766 | 2,925 | | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | Losa | 136,316 | 16,319 | 8,353 | | |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | Torta | 40,906 | 10,879 | 3,760 | | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | Losa | 56,294 | 13,500 | 4,170 | | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | Losa | 162,821 | 13,599 | 11,973 | | |

Tabla 4.14: Resultados Espectro de respuesta elástica promedio (N-S)

| Espectro Promedio N-S | | | | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|-----------------|------------|-------------------|----------------------|--------|------------|--|--|
| Estanque | Capacidad (L) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | H/R | Espesor (mm) | Período T (seg) | Tipo Apoyo | Tensión (σ) (Mpa) | Admisible (σa) (Mpa) | σ/σa | Daño | | |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | Losa | 9,862 | 21,109 | 0,467 | | | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | Losa | 9,615 | 14,926 | 0,644 | | | |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | Torta | 14,784 | 20,642 | 0,716 | | | |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | Torta | 13,341 | 17,578 | 0,759 | | | |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | Torta | 17,833 | 20,809 | 0,857 | | | |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | Torta | 15,651 | 16,232 | 0,964 | | | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | Losa | 19,754 | 18,981 | 1,041 | | | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | Losa | 17,361 | 15,695 | 1,106 | | | |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | Torta | 22,249 | 19,461 | 1,143 | | | |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | Torta | 22,240 | 19,145 | 1,162 | | | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | Losa | 20,133 | 17,195 | 1,171 | | | |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | Torta | 17,290 | 13,324 | 1,298 | | | |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | Torta | 17,991 | 12,791 | 1,406 | | | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | Losa | 22,036 | 15,075 | 1,462 | | | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | Losa | 39,929 | 16,617 | 2,403 | | | |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | Torta | 21,973 | 14,373 | 1,529 | | | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | Losa | 45,616 | 18,919 | 2,411 | | | |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | Torta | 42,968 | 16,939 | 2,537 | | | |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | Torta | 38,330 | 14,182 | 2,703 | | | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | Losa | 49,463 | 16,688 | 2,964 | | | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | Losa | 40,422 | 13,055 | 3,096 | | | |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | Torta | 46,279 | 14,793 | 3,128 | | | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | Losa | 49,333 | 15,386 | 3,206 | | | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | Losa | 54,444 | 15,766 | 3,453 | | | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | Losa | 140,010 | 16,319 | 8,580 | | | |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | Torta | 48,298 | 10,879 | 4,439 | | | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | Losa | 66,467 | 13,500 | 4,923 | | | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | Losa | 167,233 | 13,599 | 12,297 | | | |

Tabla 4.15: Resultados Espectro de respuesta elástica promedio (E-W)

| Espectro Promedio E-W | | | | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------|--------------|-----------------|------------|-------------------|----------------------|--------|------------|--|--|
| Estanque | Capacidad (L) | Altura (cm) | Diámetro (cm) | H/R | Espesor (mm) | Período T (seg) | Tipo Apoyo | Tensión (σ) (Mpa) | Admisible (σa) (Mpa) | σ/σa | Daño | | |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | Losa | 9,788 | 21,109 | 0,464 | | | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | Losa | 9,543 | 14,926 | 0,639 | | | |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | Torta | 14,673 | 20,642 | 0,711 | | | |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | Torta | 13,241 | 17,578 | 0,753 | | | |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | Torta | 17,699 | 20,809 | 0,851 | | | |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | Torta | 15,533 | 16,232 | 0,957 | | | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | Losa | 19,605 | 18,981 | 1,033 | | | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | Losa | 17,231 | 15,695 | 1,098 | | | |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | Torta | 22,081 | 19,461 | 1,135 | | | |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | Torta | 22,072 | 19,145 | 1,153 | | | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | Losa | 19,982 | 17,195 | 1,162 | | | |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | Torta | 17,160 | 13,324 | 1,288 | | | |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | Torta | 17,856 | 12,791 | 1,396 | | | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | Losa | 21,870 | 15,075 | 1,451 | | | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | Losa | 41,574 | 16,617 | 2,502 | | | |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | Torta | 21,808 | 14,373 | 1,517 | | | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | Losa | 47,496 | 18,919 | 2,511 | | | |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | Torta | 44,738 | 16,939 | 2,641 | | | |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | Torta | 39,910 | 14,182 | 2,814 | | | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | Losa | 51,501 | 16,688 | 3,086 | | | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | Losa | 42,088 | 13,055 | 3,224 | | | |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | Torta | 48,186 | 14,793 | 3,257 | | | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | Losa | 51,366 | 15,386 | 3,339 | | | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | Losa | 56,688 | 15,766 | 3,596 | | | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | Losa | 122,253 | 16,319 | 7,492 | | | |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | Torta | 50,288 | 10,879 | 4,622 | | | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | Losa | 69,206 | 13,500 | 5,126 | | | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | Losa | 146,024 | 13,599 | 10,738 | | | |

En estanques montados sobre losa, se puede observar claramente una correlación entre el período y el factor de utilización, en que a mayor período la estructura se vio mas solicitada, tal como se muestra en la figura 4.1-8.

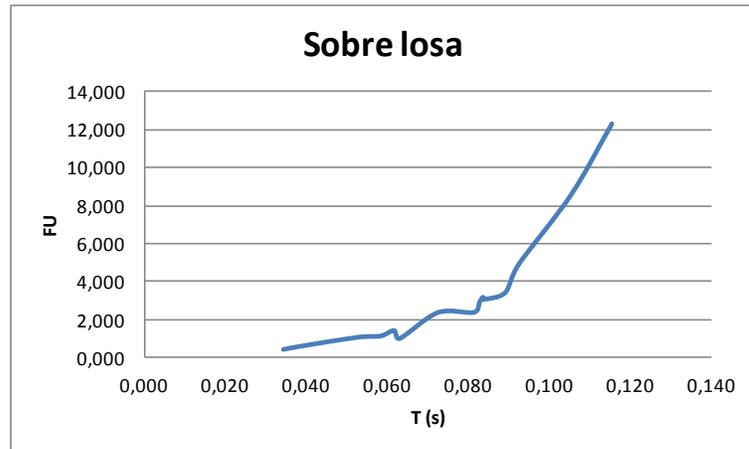


Figura 4.1-8: Relación Período-FU estanques montados sobre losa

La tabla 4.16 muestra además cómo se correlaciona el daño observado en terreno con los valores obtenidos para los períodos de vibración de los estanques.

Tabla 4.16: Relación Período-FU estanques montados sobre losa

| Estanque | Espectro Promedio N-S | | | | | | Acero 304L | | | daño |
|----------|-----------------------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | 9,862 | 21,109 | 0,467 | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | 9,615 | 14,926 | 0,644 | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | 17,361 | 15,695 | 1,106 | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | 20,133 | 17,195 | 1,171 | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | 22,036 | 15,075 | 1,462 | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | 19,754 | 18,981 | 1,041 | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | 39,929 | 16,617 | 2,403 | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | 45,616 | 18,919 | 2,411 | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | 49,463 | 16,688 | 2,964 | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | 49,333 | 15,386 | 3,206 | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | 40,422 | 13,055 | 3,096 | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | 54,444 | 15,766 | 3,453 | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | 66,467 | 13,500 | 4,923 | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | 140,010 | 16,319 | 8,580 | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | 167,233 | 13,599 | 12,297 | |

También se observa una correlación entre la esbeltez y el factor de utilización en estanques montados sobre losa, en que el factor de utilización del estanque tiende a crecer con la esbeltez, tal como se muestra en la figura 4.1-9.

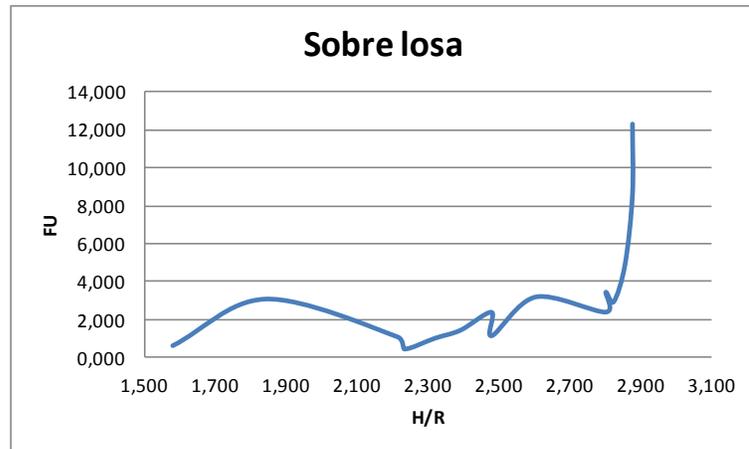


Figura 4.1-9: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre losa

La tabla 4.17 muestra además alguna correlación entre el daño observado y las esbelteces de los estanques.

Tabla 4.17: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre losa

| Espectro Promedio N-S | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | daño |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | 9,615 | 14,926 | 0,644 | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | 40,422 | 13,055 | 3,096 | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | 17,361 | 15,695 | 1,106 | |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | 9,862 | 21,109 | 0,467 | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | 19,754 | 18,981 | 1,041 | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | 22,036 | 15,075 | 1,462 | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | 39,929 | 16,617 | 2,403 | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | 20,133 | 17,195 | 1,171 | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | 49,333 | 15,386 | 3,206 | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | 45,616 | 18,919 | 2,411 | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | 54,444 | 15,766 | 3,453 | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | 49,463 | 16,688 | 2,964 | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | 66,467 | 13,500 | 4,923 | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | 140,010 | 16,319 | 8,580 | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | 167,233 | 13,599 | 12,297 | |

En cuanto a la relación entre capacidad del estanque y el factor de utilización, la figura 4.1-10 muestra que mientras más grande es el estanque, mayor es su factor de utilización.

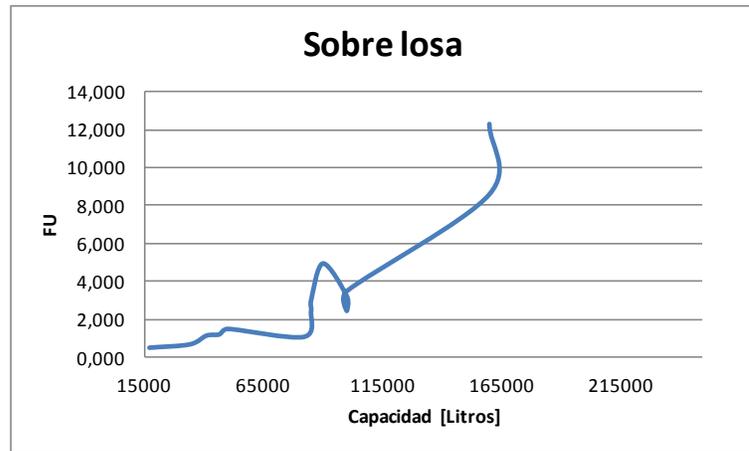


Figura 4.1-10: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre losa

Ésta tendencia es observada también en la tabla 4.17, donde se puede notar que el daño observado en terreno fue creciendo de acuerdo a la capacidad del estanque.

Tabla 4.18: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre losa

| Espectro Promedio N-5 | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | daño |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | 9,862 | 21,109 | 0,467 | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | 9,615 | 14,926 | 0,644 | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | 17,361 | 15,695 | 1,106 | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | 20,133 | 17,195 | 1,171 | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | 22,036 | 15,075 | 1,462 | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | 19,754 | 18,981 | 1,041 | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | 39,929 | 16,617 | 2,403 | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | 49,463 | 16,688 | 2,964 | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | 66,467 | 13,500 | 4,923 | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | 49,333 | 15,386 | 3,206 | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | 45,616 | 18,919 | 2,411 | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | 54,444 | 15,766 | 3,453 | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | 140,010 | 16,319 | 8,580 | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | 167,233 | 13,599 | 12,297 | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | 40,422 | 13,055 | 3,096 | |

En cuanto a la relación entre espesor y factor de utilización, la figura 4.1-11 muestra que no se observa una correlación clara entre estas dos variables:

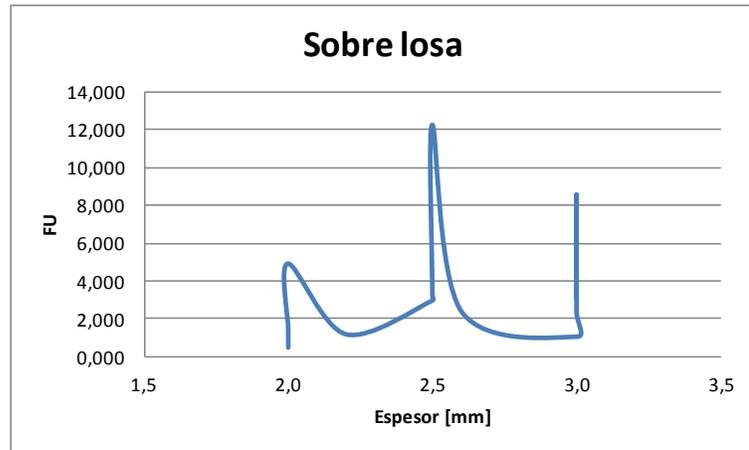


Figura 4.1-11: Relación Espesor-FU estanques montados sobre losa

En la tabla 4.19 se puede notar que a mayores espesores son mayores los daños encontrados en terreno. Éste resultado se explica observando que a mayor espesor, la capacidad también es mayor, resultando predominar el comportamiento por capacidad del estanque por sobre el comportamiento esperado por espesor. Es decir, el aumento de capacidad es mucho más abrupto que el aumento de espesor.

Tabla 4.19: Relación Espesor-FU estanques montados sobre losa

| Espectro Promedio N-S | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | daño |
| 1 | 17000 | 300 | 269 | 2,234 | 2,0 | 0,034 | 9,862 | 21,109 | 0,467 | |
| 2 | 34000 | 300 | 380 | 1,579 | 2,0 | 0,039 | 9,615 | 14,926 | 0,644 | |
| 8 | 41000 | 400 | 361 | 2,214 | 2,0 | 0,053 | 17,361 | 15,695 | 1,106 | |
| 14 | 50000 | 450 | 376 | 2,393 | 2,0 | 0,062 | 22,036 | 15,075 | 1,462 | |
| 27 | 90000 | 600 | 420 | 2,857 | 2,0 | 0,093 | 66,467 | 13,500 | 4,923 | |
| 11 | 46500 | 450 | 363 | 2,481 | 2,2 | 0,058 | 20,133 | 17,195 | 1,171 | |
| 20 | 85000 | 600 | 425 | 2,825 | 2,5 | 0,083 | 49,463 | 16,688 | 2,964 | |
| 23 | 100000 | 600 | 461 | 2,605 | 2,5 | 0,084 | 49,333 | 15,386 | 3,206 | |
| 24 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 2,5 | 0,089 | 54,444 | 15,766 | 3,453 | |
| 28 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 2,5 | 0,116 | 167,233 | 13,599 | 12,297 | |
| 15 | 85000 | 550 | 444 | 2,480 | 2,6 | 0,073 | 39,929 | 16,617 | 2,403 | |
| 7 | 82000 | 520 | 448 | 2,321 | 3,0 | 0,063 | 19,754 | 18,981 | 1,041 | |
| 17 | 100000 | 630 | 450 | 2,803 | 3,0 | 0,081 | 45,616 | 18,919 | 2,411 | |
| 25 | 160000 | 750 | 521 | 2,878 | 3,0 | 0,105 | 140,010 | 16,319 | 8,580 | |
| 21 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 3,0 | 0,084 | 40,422 | 13,055 | 3,096 | |

Por su parte, los estanques montados sobre torta, muestran una correlación entre el período y el factor de utilización, tal como se muestra en la figura 4.1-12, en que a mayor período de vibración, mayor es el factor de utilización.

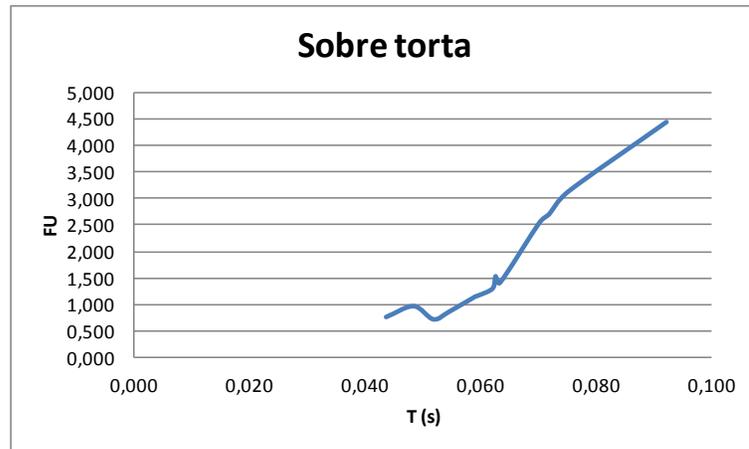


Figura 4.1-12: Relación Período-FU estanques montados sobre torta

La tabla 4.20 muestra que en general todos estos estanques se encontraron dañados, inclusive los de períodos y factores de utilización mas bajos.

Tabla 4.20: Relación Período-FU estanques montados sobre torta

| Espectro Promedio N-S | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | daño |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | 13,341 | 17,578 | 0,759 | daño |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | 15,651 | 16,232 | 0,964 | daño |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | 14,784 | 20,642 | 0,716 | daño |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | 17,833 | 20,809 | 0,857 | daño |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | 22,249 | 19,461 | 1,143 | daño |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | 22,240 | 19,145 | 1,162 | daño |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | 17,290 | 13,324 | 1,298 | daño |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | 21,973 | 14,373 | 1,529 | daño |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | 17,991 | 12,791 | 1,406 | daño |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | 42,968 | 16,939 | 2,537 | daño |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | 38,330 | 14,182 | 2,703 | daño |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | 46,279 | 14,793 | 3,128 | daño |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | 48,298 | 10,879 | 4,439 | daño |

La figura 4.1-13 muestra la relación entre esbeltez y factor de utilización en estanques montados sobre torta.

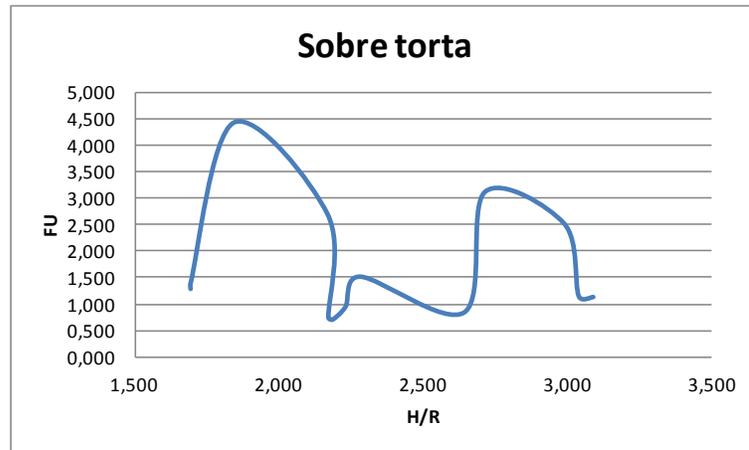


Figura 4.1-13: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre torta

Como se observa no es posible indicar una tendencia clara. Según lo observado en la tabla 4.21, existe una tendencia al crecimiento inverso de la esbeltez y la capacidad, pudiendo ser ésta una razón para el comportamiento irregular de éstos resultados.

Tabla 4.21: Relación Esbeltez-FU estanques montados sobre torta

| Espectro Promedio N-S | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | daño |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | 17,290 | 13,324 | 1,298 | |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | 17,991 | 12,791 | 1,406 | |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | 48,298 | 10,879 | 4,439 | |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | 38,330 | 14,182 | 2,703 | |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | 13,341 | 17,578 | 0,759 | |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | 14,784 | 20,642 | 0,716 | |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | 15,651 | 16,232 | 0,964 | |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | 21,973 | 14,373 | 1,529 | |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | 17,833 | 20,809 | 0,857 | |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | 46,279 | 14,793 | 3,128 | |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | 42,968 | 16,939 | 2,537 | |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | 22,240 | 19,145 | 1,162 | |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | 22,249 | 19,461 | 1,143 | |

En la figura 4.1-14 se observa la relación entre capacidad y factor de utilización en estanques montados sobre torta.

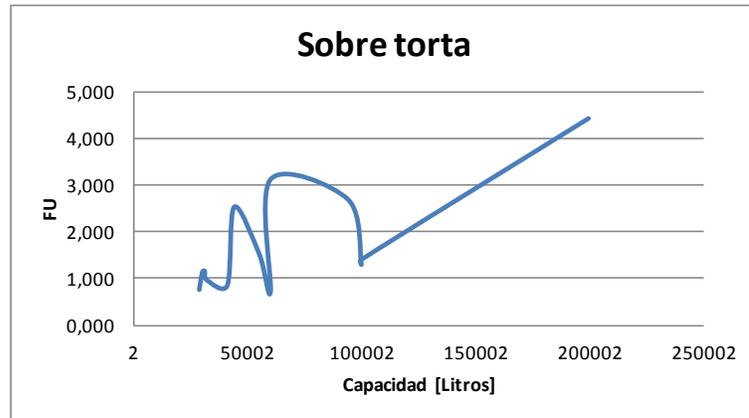


Figura 4.1-14: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre torta

Es posible ver una tendencia al crecimiento de ambas variables, al igual que en el caso de estanques apoyados sobre losa. En este caso, como muestra la tabla 4.22, se ve una mejor correlación entre los resultados obtenidos y el daño registrado en terreno.

Tabla 4.22: Relación Capacidad-FU estanques montados sobre torta

| Espectro Promedio N-S | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | daño |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | 13,341 | 17,578 | 0,759 | daño |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | 22,249 | 19,461 | 1,143 | daño |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | 22,240 | 19,145 | 1,162 | daño |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | 15,651 | 16,232 | 0,964 | daño |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | 17,833 | 20,809 | 0,857 | daño |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | 42,968 | 16,939 | 2,537 | daño |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | 21,973 | 14,373 | 1,529 | daño |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | 14,784 | 20,642 | 0,716 | daño |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | 46,279 | 14,793 | 3,128 | daño |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | 38,330 | 14,182 | 2,703 | daño |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | 17,290 | 13,324 | 1,298 | daño |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | 17,991 | 12,791 | 1,406 | daño |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | 48,298 | 10,879 | 4,439 | daño |

En cuanto a la relación entre espesor y factor de utilización en estanques montados sobre torta, la figura 4.1-15 muestra, al igual que en el caso de estanques montados sobre losa, que no se observa una correlación clara entre estas dos variables:

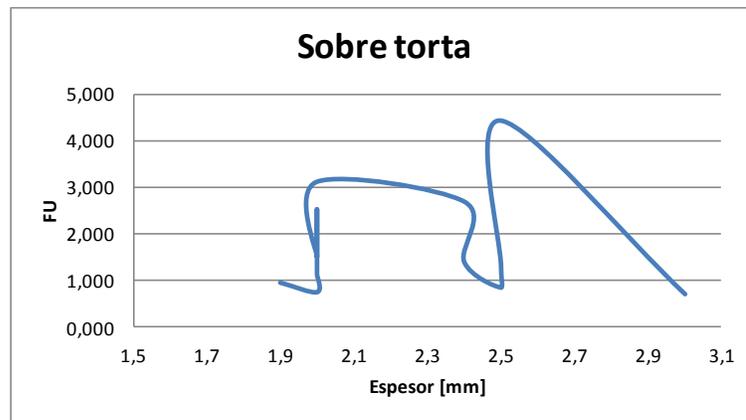


Figura 4.1-15: Relación Espesor-FU estanques montados sobre torta

Como se observa en la tabla 4.23, al igual que en el caso de estanques montados sobre losa, el aumento de capacidad tuvo mayor relevancia que el aumento de espesor.

Tabla 4.23: Relación Espesor-FU estanques montados sobre torta

| Espectro Promedio N-S | | | | | | | | Acero 304L | | |
|-----------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Estanque | Capacidad | Altura | Diámetro | H/R | Espesor | Período T | Tensión (σ) | Admisible (σ_a) | σ/σ_a | daño |
| 6 | 32000 | 370 | 332 | 2,230 | 1,9 | 0,048 | 15,651 | 16,232 | 0,964 | daño |
| 4 | 28600 | 350 | 323 | 2,170 | 2,0 | 0,043 | 13,341 | 17,578 | 0,759 | daño |
| 9 | 30000 | 450 | 291 | 3,089 | 2,0 | 0,059 | 22,249 | 19,461 | 1,143 | daño |
| 10 | 31000 | 450 | 296 | 3,039 | 2,0 | 0,059 | 22,240 | 19,145 | 1,162 | daño |
| 18 | 44000 | 500 | 335 | 2,987 | 2,0 | 0,070 | 42,968 | 16,939 | 2,537 | daño |
| 16 | 55000 | 450 | 394 | 2,281 | 2,0 | 0,062 | 21,973 | 14,373 | 1,529 | daño |
| 22 | 60000 | 520 | 383 | 2,713 | 2,0 | 0,075 | 46,279 | 14,793 | 3,128 | daño |
| 19 | 94000 | 520 | 480 | 2,168 | 2,4 | 0,072 | 38,330 | 14,182 | 2,703 | daño |
| 13 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,4 | 0,063 | 17,991 | 12,791 | 1,406 | daño |
| 5 | 41000 | 450 | 341 | 2,642 | 2,5 | 0,054 | 17,833 | 20,809 | 0,857 | daño |
| 12 | 100000 | 450 | 532 | 1,692 | 2,5 | 0,062 | 17,290 | 13,324 | 1,298 | daño |
| 26 | 200000 | 600 | 651 | 1,842 | 2,5 | 0,092 | 48,298 | 10,879 | 4,439 | daño |
| 3 | 60000 | 450 | 412 | 2,184 | 3,0 | 0,052 | 14,784 | 20,642 | 0,716 | daño |

En general, se puede apreciar, de las figuras 4.1-8 a 4.1-15, que el método representa de mejor manera a los estanques de apoyo continuo sobre losa, por sobre los estanques montados sobre torta.

Capítulo 5 CONCLUSIONES

5.1 Resumen del Trabajo

En el presente trabajo se estudió el comportamiento de los elementos de almacenamiento propios de la industria vitivinícola nacional, específicamente estanques de acero inoxidable. El estudio estuvo basado en varias etapas, marcadas fuertemente por el trabajo en terreno, en donde se realizó un levantamiento de daños a gran escala.

A partir de este levantamiento, se reconocieron y caracterizaron los principales comportamientos, que derivan en daños y fallas, a los que se ven expuestos los estanques al ser víctimas de una sollicitación sísmica, para finalmente elaborar un manual con recomendaciones para mejorar la industria en su desempeño frente a eventos sísmicos.

Este trabajo entregó a la industria del vino, de gran importancia en nuestro país, un primer gran paso hacia la cultura sísmica.

Para entender de mejor manera el comportamiento visto en terreno, se aplicó un análisis lineal simplificado para corroborar los daños observados en terreno y evaluar las tensiones esperadas para los niveles de sollicitación impuestos por el sismo del 27 de Febrero de 2010.

5.2 Conclusiones

- El terremoto del Maule afectó a la gran mayoría de las viñas del territorio nacional, por lo que este trabajo y sus homólogos toman gran relevancia ya que inducen un avance en el desarrollo de la cultura sísmica en las industrias nacionales.
- Según reportes oficiales las pérdidas corresponden a cerca de 125 millones de litros de vino. Dado que el sismo ocurrió en los inicios de la vendimia, las pérdidas no fueron más catastróficas.
- Dados los resultados de este trabajo, se indica la necesidad de efectuar una revisión a los criterios de diseño de estanques de acero inoxidable para almacenamiento de vino.
- El diseño de bodegas debe ser realizado por un ingeniero estructural, y la instalación y construcción por personal calificado.

- En general se observó que los soportes (losas o tortas) no estaban armadas y en ocasiones no contaban con un diseño apropiado, encontrándose algunas configuraciones rústicas que resultaron en fallas.
- Estanques de hormigón armado tuvieron un excelente comportamiento. Sólo se observaron daños en unos pocos estanques, principalmente agrietamiento horizontal por flexión y diagonal por corte.
- Estanques de acero inoxidable se vieron mucho más afectados, desarrollando los daños y fallas revisadas en el capítulo 3. Esto se debe a diseños mal efectuados, con espesores deficientes que no cumplen con las normas (específicamente API650). En este sentido, se indica además, que la principal norma utilizada en nuestro país para el diseño de estanques no es directamente aplicable ya que está orientada a estanques petrolíferos, cuyas especificaciones indican espesores mínimos de 5 mm, lo cual es económicamente difícil de aplicar en el mercado. Por esta razón, los espesores utilizados por los fabricantes para las planchas de acero van de 2 a 3 mm.
- Del levantamiento de daños correspondiente a estanques apoyados, se pueden extraer 2 grandes conclusiones. Primero, se observaron dos tipos de situaciones: daños en estructuras y fallas en estructuras. Es, en términos de factibilidad, difícil lograr una eliminación total de daños; sin embargo, en cuanto éstos no provoquen pérdida de contenido o detención de los procesos productivos, serán considerados aceptables. Por otro lado, fallas con resultado de pérdidas y/o riesgos para la integridad del personal no pueden ser aceptadas y deberán ser eliminadas siguiendo las recomendaciones correspondientes. Segundo, es en definitiva, el ítem de anclajes uno de los más importantes en el desempeño de los estanques, por lo cual su diseño deberá ser realizado con bases en la ingeniería estructural y su implementación y construcción por personal calificado.
- Se observó gran heterogeneidad de las estructuras, razón por la cual los comportamientos observados fueron muy variados, extrayendo como conclusión que los estanques de diseño más artesanal fueron los más afectados.
- En este trabajo se confirman las conclusiones del trabajo “*Estanques de Acero Inoxidable de la Industria Vitivinícola: Revisión del Diseño*” en el que se indicó que casi la totalidad de los estanques no anclados fallarían por pandeo o volcamiento y que en términos generales la industria no se encontraba preparada para un evento sísmico de gran magnitud.

- Las solicitudes efectivas producto de un sismo de gran magnitud pueden llegar a ser mucho mayores que las solicitudes de diseño. Como se puede observar en la Figura 4.1-3, para períodos bajos (que es el caso del período del modo impulsivo) la solicitud efectiva llegó a ser cerca del 600% de la solicitud de diseño.

5.3 Limitaciones del Trabajo y Trabajo Futuro

El presente trabajo ha sido desarrollado bajo un carácter casi netamente observacional, con etapas fuertemente marcadas por el traspaso de la cultura sísmica a altos cargos y funcionarios de planta en las diversas empresas pertenecientes a la industria del vino.

A partir de este trabajo, se toma conocimiento de deficiencias revisadas en terreno, que tienen relación tanto con el diseño, como con la instalación y/o montaje de los estanques de acero. Además, dichas deficiencias son revisadas de manera simplificada en el desarrollo de este trabajo. Es por esto que se recomienda, dada la relevancia de esta industria el desarrollo de una normativa específica para estanques con bases en la experiencia nacional. Por otro lado, tomando en consideración que los anclajes resultaron ser un ítem fundamental para el buen comportamiento tanto de estanques apoyados como de estanques montados sobre patas, es recomendado el análisis detallado de anclajes para estanques de acero.

Dado que en esta memoria no se abarca el comportamiento no lineal de las estructuras, se esperan análisis de este tipo para trabajos futuros. En resumen, el presente trabajo forma parte de un camino de desarrollo, en que las tareas siguientes pueden ser las mencionadas a continuación:

- *Desarrollo de normativa específica para estanques de acero inoxidable:* tomando como referencia la experiencia nacional y otorgando la importancia que éstas estructuras tienen en la industria, no sólo vitivinícola.
- *Análisis de anclajes para estanques de acero:* dada la inmensa relevancia de los anclajes en el comportamiento, sería interesante la generación de un manual de detallamientos para anclajes específicamente para estanques de acero inoxidable. Con esto se espera lograr una baja en la heterogeneidad de los diseños, logrando un diseño menos abierto con una efectividad estudiada.
- *Análisis no lineal de estanques:* las normas reducen las fuerzas de diseño por factores altos ($R=4$ NCh2369). Se ha visto que los estanques experimentan esfuerzos mucho mayores a los correspondientes a los rangos lineales, sufriendo algunos daños. La respuesta no lineal está directamente relacionada con el uplift

propio de estos estanques y también debe ser incluida en el análisis de anclajes, los que pueden ser considerados como disipadores de energía.

- *Extensión a otros elementos importantes:* una cantidad importante del vino (18% en vendimia y 26% el resto del año) es almacenado en barricas y botellas, por lo cual es relevante desarrollar un estudio para la protección sísmica de barricas, racks y bins.
- Se plantea incorporar, como medida a mediano y largo plazo, las conclusiones del proyecto asociado a este trabajo de título, a la formación académica de profesionales encargados de bodegas vitivinícolas.

REFERENCIAS

- [1] Barros, D., “*Estanques de Acero Inoxidable de la Industria Vitivinícola: Revisión del Diseño*”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2007.
- [2] Sandoval, V., “*Análisis de los efectos del Terremoto del 27 de Febrero de 2010 en Estanques de Acero Inoxidable de Pared Delgada (EAIPD) con Patas y Desarrollo de un sistema de Protección Sísmica para estas Estructuras*”, Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile, 2011.
- [3] Virella, J.C., Godoy, L.A., Suárez, L.E. “*Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation*”. Journal of Constructional Steel Research. 62: 521-531. 2006.
- [4] Virella, J.C., Godoy, L.A., Suárez, L.E. “*A Static Nonlinear Procedure for the Evaluation of the Elastic Buckling of Anchored Steel Tanks due to Earthquakes*”. Journal of Earthquake Engineering. 12: 999-1022. 2008.
- [5] INN., “*Norma Chilena 2369 of 2003 Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*”. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile, 2003.
- [6] SERGIO BARRIENTOS. Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010 [en línea] <<http://ssn.dgf.uchile.cl/seismo.html>>
- [7] Housner, G.W., “*Earthquake pressures on fluid containers*”, California Institute of Technology, 1954. pp. 40.
- [8] Housner, G.W., “*The dynamic behavior of water tanks*”, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 53, No. 2: 381-387. 1963
- [9] American Petroleum Institute, “*Welded Tanks for Oil Storage, API Standard 650*”, eleventh edition, USA, 2007.
- [10] Terremoto del Maule Chile 2010, Manual de buenas prácticas y recomendaciones sísmicas para equipos de bodegas viníferas. Ediciones Consorcios del Vino. 2011
- [11] American Society of Civil Engineers, “*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Std.7-05*”, USA, 2005.

- [12] American Concrete Institute, *“Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario, ACI 318S-08”*, USA, 2008.
- [13] Malhotra, P., Wenk, T., Wieland, M., *“Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks”*. Structural Engineering International, 3: 197-201. 2000.
- [14] Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), *“El Sector Vitivinícola en Chile, Capacidades de Investigación y Áreas de Desarrollo Científico-Tecnológico”*. Santiago, Chile, 2007.
- [15] Malhotra, P., *“Practical Nonlinear Seismic Analysis of Tanks”*. Earthquake Spectra. Volume 16, No. 2 USA, May 2000. P 473-492.
- [16] American Concrete Institute, *“Evaluación del Comportamiento de los Anclajes Mecánicos para Instalar en Hormigón Endurecido, ACI 355.2-01”*, USA, 2001.
- [17] <http://terremotos.ing.uchile.cl/registros/164>
- [18] <http://www.winesofchile.org>
- [18] <http://www.sil.gob.cl>

ANEXO A

En el presente anexo se incluye a modo de ejemplo el diseño básico de manto y anclajes en tracción para un estanque de 60.000 litros siguiendo las disposiciones de los códigos y/o normas siguientes:

- Nch2369of2003
- API Std 650 2007
- ACI318 2008

A.1 Características del Estanque

Contenido : Vino para fermentación

Densidad : 1 ton/m³

Capacidad : 60 m³

A.2 Solicitaciones

Según NCh2369 of.2003, considerando:

- Suelo Tipo III:
 - $n = 1,8$
 - $T' = 0,62$
- Zona Sísmica 3:
 - $A_0 = 0,4g$
- Coeficiente de Importancia:
 - $I = 1,2$ (Categoría C1 NCh 2369)
- Razones de amortiguamiento:
 - Modo impulsivo: $\varepsilon = 2\%$
 - Modo convectivo: $\varepsilon = 0,5\%$
- Factor de reducción de la respuesta:
 - $R = 4$

Coeficiente sísmico:

Modo impulsivo: $C_{imp}=C_{max}=0,32$

(Tabla 5.7 Nch2369)

Modo convectivo: $C = \frac{2,75 A_0}{gR} \left(\frac{T'}{T^*}\right)^n \left(\frac{0,05}{\varepsilon}\right)^{0,4} > 0,1 \frac{A_0}{g}$

A.3 Dimensionamiento General

Sea $D=4$ m el diámetro del estanque, luego, la altura de llenado es:

$$H = \frac{4 \cdot 60m^3}{\pi \cdot D^2} = 4,775 \text{ m}$$

Para determinar la altura del estanque, se calcula la altura máxima de ola por sloshing:

$$d = R_E \frac{S_e(T_{con})}{g}$$

$$S_e(T_{con}) = \frac{2,75 A_0 I}{R} \left(\frac{T'}{T_{con}}\right)^n \left(\frac{0,05}{\varepsilon}\right)^{0,4}$$

$$T_{con} = 1,8k_s \sqrt{D}$$

$$k_s = \frac{0,578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3,68H}{D}\right)}}$$

Con lo cual:

$$T_{con} = 2,08 \text{ seg}$$

$$S_e(T_{con}) = 0,0937g$$

$$d = 0,187 \text{ m}$$

Luego, la altura total del estanque es:

$$H_E = H + d = 4,962 \text{ m}$$

Se toma como altura de diseño: $H_E = 5 \text{ m}$

Con esto:

$$H_E = 5 \text{ m}$$

$$R_E = 2 \text{ m}$$

$$H_E/R_E = 2,5$$

$$D/H_E = 0,8$$

A.4 Diseño del Manto

Para el diseño del manto se utiliza el método "1 foot method" del acápite 5.6.3., equivalente a especificaciones de Apéndice S considerando eficiencia de soldadura de 1,0.

$$t_d = \frac{4,9D(H_E - 0,3)G}{S_d} + CA$$

$$t_t = \frac{4,9D(H_E - 0,3)}{S_t}$$

Para:

$$G = 1$$

$$S_d = 137 \text{ MPa}$$

$$S_t = 154 \text{ MPa}$$

De acápites 5.6.2.1 y 5.6.2.2, utilizando ASTM A283 de características similares a 304L.

$$t_d = 0,67 \text{ mm}$$

$$t_t = 0,59 \text{ mm}$$

Según acápite 5.6.1.1 para $D < 15 \text{ m}$, se dispone $t = 5 \text{ mm}$

A.4 Plancha de Fondo

Según acápite 5.4.1 $t_f = 6 \text{ mm}$

A.5 Diseño Sísmico del Estanque

Para el diseño sísmico del estanque se siguen las disposiciones del apéndice E “Seismic Design of Storage Tanks”.

Según NCh2369 of.2003, considerando:

- Suelo Tipo III:
 - $n = 1,8$
 - $T' = 0,62$

- Zona Sísmica 3:
 - $A_0 = 0,4g$

- Coeficiente de Importancia:
 - $I = 1,2$ (Categoría C1 NCh 2369)

- Razones de amortiguamiento:
 - Modo impulsivo: $\varepsilon = 2\%$
 - Modo convectivo: $\varepsilon = 0,5\%$

- Factor de reducción de la respuesta:
 - $R = 4$

Coeficiente sísmico:

Modo impulsivo: $C_{imp}=C_{max}=0,32$ (Tabla 5.7 Nch2369)

Modo convectivo: $C_{con} = \frac{2,75 A_0}{gR} \left(\frac{T'}{T^*}\right)^n \left(\frac{0,05}{\varepsilon}\right)^{0,4} > 0,1 \frac{A_0}{g}$

$$C_{con} = 0,078$$

Con esto:

$$C_{imp} = 0,320$$

$$C_{con} = 0,078$$

Momento Volcante:

$$M_{rw} = \sqrt{(A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r))^2 + (A_c W_c X_c)^2}$$

$$A_i = C_{imp} I g = 0,384 g$$

$$A_c = C_{con} I g = 0,093 g$$

Según las ecuaciones del capítulo 2, Ec.2.2 a Ec.2.5, se tiene:

$$\frac{W_i}{W_p} = 0,866$$

$$\frac{W_c}{W_p} = 0,184$$

$$\frac{X_i}{H_E} = 0,425$$

$$\frac{X_c}{H_E} = 0,786$$

Según acápite 5.10.2.2, se tiene para el techo un espesor $t_r = 6 mm$

$$W_r \approx 500 Kg$$

$$W_s = 2500 Kg$$

Con lo cual:

$$\text{Momento Volcante: } M_{rw} = 450031,284 Nm$$

Resistencia al Volcamiento:

$$w_a = 99 t_a \sqrt{F_y H G_e} \leq 201.1 H D G_e$$

Según Nch2369 Of.2003 acápite 11.8.9 “En los casos en que la norma de diseño empleada considere la acción vertical, el coeficiente sísmico vertical debe ser igual a 2/3 del coeficiente del modo impulsivo”

$$\text{Con esto, se tiene: } A_v = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot 0,384 g = 0,256 g$$

Además,

$$t_a = 6 mm$$

$$F_y = 210 Mpa$$

$$H = H_E = 5 \text{ m}$$

$$G_e = G(1 - 0,4A_v) = 1(1 - 0,4 \cdot 0,256) = 0,8976$$

$$w_a = 18235,703 \text{ N/m} > 201,1HDG_e = 3610,147 \text{ N/m}$$

$$\Rightarrow w_a = 3610,147 \text{ N/m}$$

$$w_t = 2349,55 \text{ N/m}$$

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2[w_t(1-0,4A_v)+w_a-0,4w_{int}]} > 4,91 > 1,54 \quad (\text{Según asíntota en Figura A.1})$$

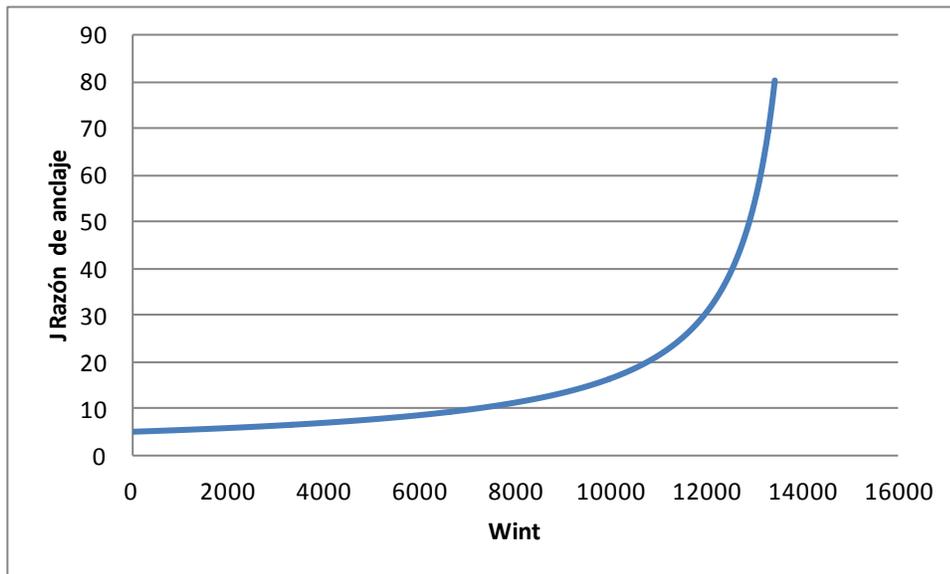


Figura A.1: Asíntota razón de anclaje

Por lo tanto, según Tabla E-6, el estanque no es estable. Se agregará anclaje mecánico.

Tensión máxima de Compresión:

Según ecuación E.6.2.2.2-1a del apéndice E, para estanque anclados mecánicamente:

$$\sigma_c = \left(w_t(1 - 0,4A_v) + \frac{1,273M_{rw}}{D^2} \right) \left(\frac{1}{1000t_s} \right) = 7,583 \text{ MPa}$$

La tensión admisible según API650 es:

$$F_C = \begin{cases} 83t/D & \frac{GHD^2}{t^2} \geq 1.333 \\ 83t/2,5D + 7,5\sqrt{GH} < 0,5F_y & \frac{GHD^2}{t^2} < 1.333 \end{cases}$$

$$F_C = 58,27 \text{ MPa}$$

La tensión admisible según NCh2369 Of.2003 es:

$$\sigma_a = \min\left(135 \cdot F_y \cdot \frac{e}{D}, 0.8 \cdot F_y\right) = 35,438 \text{ MPa}$$

Solicitaciones anclajes:

Los anclajes serán dimensionados para proveer al menos la siguiente resistencia mínima:

$$w_{AB} = \left(\frac{1.273M_{rw}}{D^2} - w_t(1 - 0.4A_v)\right) = 33696 \text{ N}$$

Según E.7.1.2 al menos 6 anclajes deben ser provistos, el espaciamiento entre anclajes no debe exceder los 3 metros.

Cuando se usan pernos de anclaje, deben tener un diámetro mínimo de 25 mm, excluyendo tolerancia a la corrosión. Anclajes de pernos enganchados u otro sistema de anclaje basado únicamente en el contacto o fricción mecánica no serán usados cuando el apéndice E solicita un diseño sísmico.

La carga de diseño sísmico para anclaje, está definida por:

$$P_{AB} = w_{AB} \left(\frac{\pi D}{n_A}\right) = 33696,658 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 4}{6}\right) = 70574,115 \text{ N}$$

Para este diseño no se requiere considerar la carga de viento en combinación con la carga sísmica (Acápite E.6.2.1.2 API650).

Para el diseño de anclajes se utilizará un anclaje de grupo, del tipo 2 (Anexo B, Barros, 2007) Mostrado en la figura A.2.

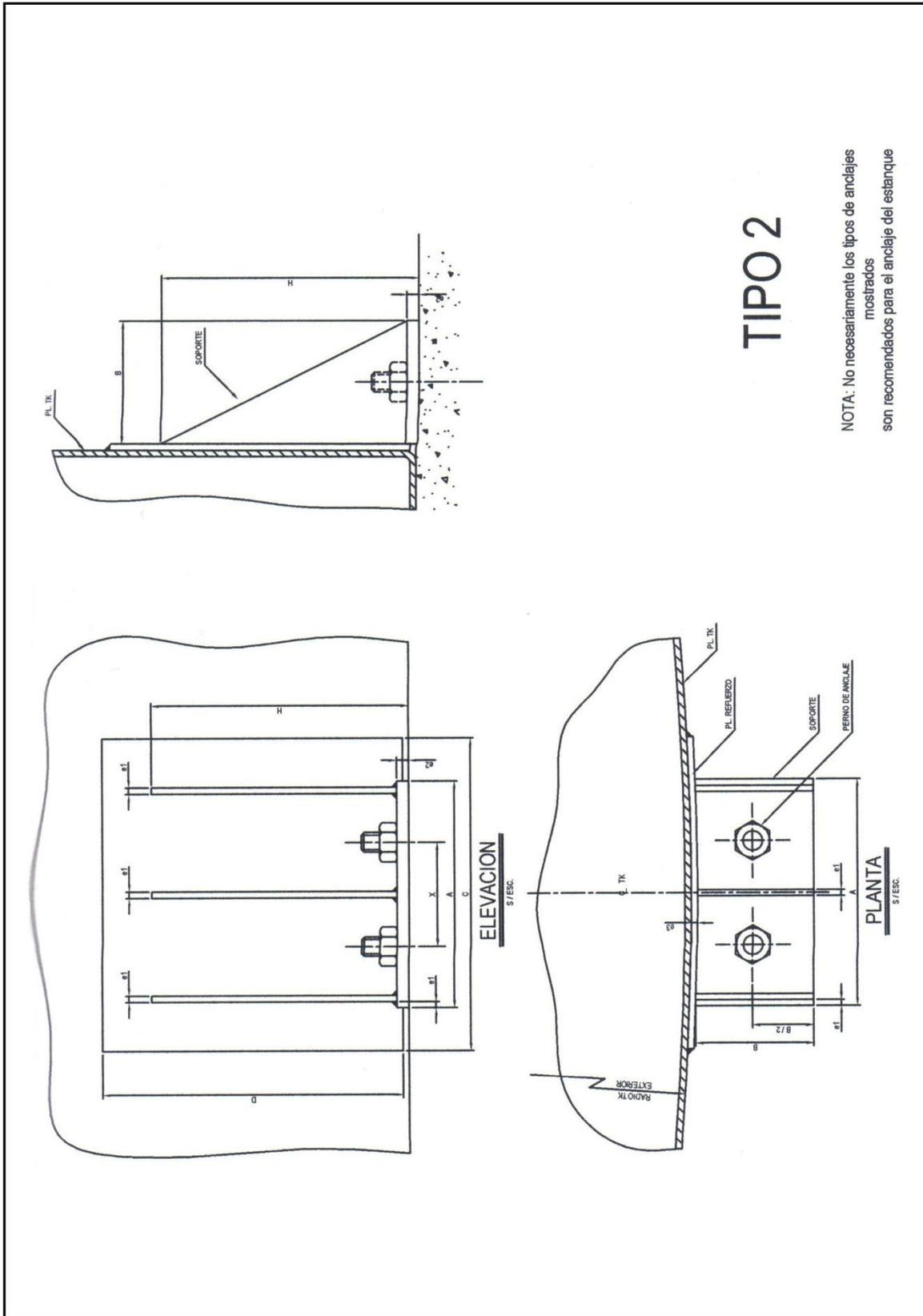


Figura A.2: Anclaje tipo 2 (Barros, 2007)

El diseño se realizará tomando como normativa lo estipulado en el apéndice D del ACI318-08.

Los pernos utilizados serán del tipo ASTM A490 con las siguientes características:

$$\begin{aligned}
 f_{ya} &= 850 \text{ Mpa} && : \text{Tensión de fluencia} \\
 d_a &= 25 \text{ mm} && : \text{Diámetro anclaje} \\
 n_t &= 0,32 \frac{\text{hilos}}{\text{mm}} && : \text{Número de hilos por milímetro.}
 \end{aligned}$$

El hormigón para el bloque de fundación será de calidad H30 ($f_c' = 25 \text{ MPa}$)

La resistencia nominal de un anclaje o grupo de anclajes en tracción, no debe exceder:

$$N_{sa} = nA_{se,N}f_{uta}$$

En este caso, se tiene:

$n = 2$: Número de anclajes del grupo.

$$A_{se,N} = \frac{\pi}{4} \left(d_a - \frac{0,9743}{n_t} \right) = 391 \text{ mm}^2 : \text{Área transversal efectiva del anclaje en tracción}$$

f_{uta} : Resistencia especificada a la tracción del acero del anclaje (MPa)

$$f_{uta} \leq \min(1,9f_{ya}; 860) = 860 \text{ Mpa}$$

f_{ya} : Resistencia especificada a la fluencia del acero del anclaje (MPa)

$$N_{sa} = 672,382 \text{ KN}$$

Los modos de falla para los cuales se especifica la resistencia son los siguientes:

- **Resistencia al arrancamiento del concreto de anclajes en tracción.**

La resistencia nominal de arrancamiento del concreto para un grupo de anclajes en tracción no debe exceder:

$$N_{cbg} = \frac{A_{NC}}{A_{NCO}} \varphi_{ec,N} \varphi_{ed,N} \varphi_{c,N} \varphi_{cp,N} N_b$$

$$\varphi_{ec,N} = 1 \quad \text{(D-9)}$$

$$\varphi_{c,N} = 1,4 \quad \text{(D.5.2.6)}$$

$$\varphi_{cp,N} = 0,444 \quad \text{(D.13)}$$

Para anclajes interiores lejanos al borde ($c_a \geq 1,5h_{ef}$):

$$\varphi_{ed,N} = 1 \quad (D.10)$$

Para anclajes cercanos al borde ($c_a < 1,5h_{ef}$):

$$\varphi_{ed,N} = 0,7 + 0,3 \frac{c_a}{1,5h_{ef}} \quad (D.11)$$

Se define la geometría de los anclajes cercanos al borde como muestra la figura A.3:

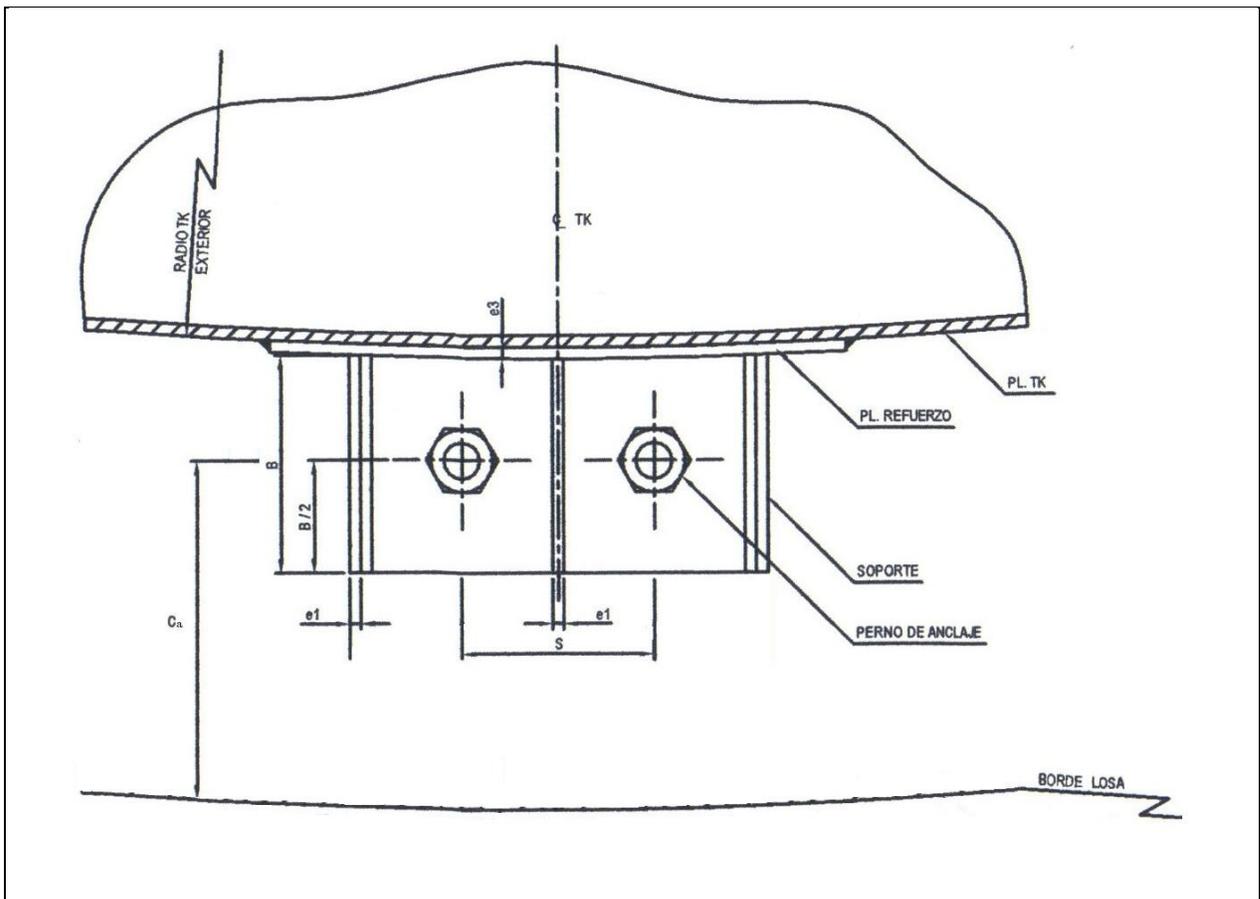


Figura A.3: Geometría anclaje de borde

$c_a = 200 \text{ mm}$: Distancia al borde.
 $h_{ef} = 180 \text{ mm}$: Penetración perno.
 $S = 150 \text{ mm}$: Distancia entre pernos del grupo.

Luego:

$$\varphi_{ed,N} = 0,922$$

$$A_{Nc} = 347800 \text{ mm}^2$$

$$A_{Nco} = 291600 \text{ mm}^2$$

$$N_b = 84,523 \text{ KN}$$

Con esto: $N_{cbg} = 57,85 \text{ KN}$

- **Resistencia a la extracción por deslizamiento de anclajes en tracción.**

La resistencia nominal a la extracción por deslizamiento de un anclaje en tracción, N_{pn} , no debe exceder:

$$N_{pn} = \varphi_{c,P} N_P$$

$$\varphi_{c,P} = 1,4 : \quad (D.5.3.6)$$

$$N_P = 8A_{brg} f_c$$

$$A_{brg} \geq 4A_b = 1564 \text{ mm}^2$$

$$N_{pn} = 437,92 \text{ KN}$$

- **Resistencia al desprendimiento lateral del concreto en un anclaje con cabeza en tracción.**

Dado que $h_{ef} < 2,5c_a$ el modo de falla no aplica.

Luego:

$$\varnothing N_n = 0,8 \cdot \min \{ N_{sa} ; N_{cbg} ; N_{pn} \} = 0,8 \cdot 57,85 \text{ KN} = 46,28 \text{ KN}$$

Con esto: $\frac{N_{ua}}{\varnothing N_n} = 1,52$

Luego, se debe aumentar el número de anclajes:

La carga de diseño sísmico para anclaje, con $n_A = 9$, es:

$$P_{AB} = w_{AB} \left(\frac{\pi D}{n_A} \right) = 33696,658 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 4}{9} \right) = 47,049 \text{ KN}$$

Con lo cual: $\frac{N_{ua}}{\phi N_n} = 1,01$

Los anclajes de grupo serán equiespaciados.