



Validación Bases Sísmicas
Proyecto suministro de calor BHP
Ingeniería Civil en Obras Civiles

Alumno: Camila López Benítez

Santiago, diciembre 2023

Contenido

1. Resumen Ejecutivo	5
2. Introducción	7
3. Objetivos	8
3.1 Objetivo SMART	8
3.2 Objetivos específicos	8
4. Estado del Arte	9
4.1 Casos de éxito.....	9
4.2 Casos de fracaso	9
4.3 Normas, estándares y códigos	11
5. Metodologías	12
5.1 Normas y estándares.....	12
5.2 Revisión especificaciones del proyecto.....	12
5.3 Matriz con parámetros sísmicos	12
5.4 Análisis de sensibilidad.....	16
6. Solución escogida	16
7. Riesgos y mitigaciones.....	17
8. Evaluación Económica	19
9. Medidas de desempeño	20
10. Desarrollo del proyecto.....	21
11. Resultados	22
12. Conclusiones.....	23
13. Recomendaciones	24
14. Anexos	25
15. Referencias.....	33

Índice de tablas

Tabla 4.1: Características de tanques de la refinería de Concón durante el terremoto de 1985	10
Tabla 5.1: Matriz versión 0	14
Tabla 5.2: Matriz versión 1 con justificación	15
Tabla 7.1: Definición de las categorías de impacto	17
Tabla 7.2: Matriz de riesgo	17
Tabla 7.3: Eventos y su nivel de riesgo	18
Tabla 8.1: Inversión para la construcción de los tanques y fecha de pago	19
Tabla 8.2 Costos y fecha de pago proyecto sin bases sísmicas	19
Tabla 8.3: Costos y fecha de pago proyecto con bases sísmicas	20
Tabla 13.1: Período Impulsivo y Convectivo	29
Tabla 13.2: Coeficientes sísmicos según API650 y NCh2369	30
Tabla 13.3: Propiedades del material y espesores del manto	30
Tabla 13.4: Análisis de sensibilidad para el espesor del manto del tanque de 15.000 m3	30

Nomenclatura

Los símbolos empleados en el desarrollo del proyecto tienen el significado indicado a continuación:

Ao: Aceleración efectiva máxima del suelo (g).

SUG: Seismic use group.

I: Coeficiente de importancia.

Ri: Factor de modificación de la respuesta horizontal impulsiva.

Rc Factor de modificación de la respuesta horizontal convectiva.

Rv: Factor de modificación de la respuesta vertical.

ξ_i : Razón de amortiguamiento impulsivo.

ξ_c : Razón de amortiguamiento conectivo.

ξ_v : Razón de amortiguamiento vertical.

S: Valor resultante de la superposición modal espectral.

To: Período que depende del tipo de suelo (s).

T': Parámetro que depende del tipo de suelo (s).

n: Parámetro que depende del tipo de suelo.

p: Parámetro que depende del tipo de suelo.

Vs30: Velocidad de propagación de onda de corte en los 30 m superiores del terreno.

δ_s : Altura de ola (m).

JE: eficiencia de la unión.

Fy: Límite elástico mínimo (MPa).

Sd: Tensión de diseño permitida (MPa).

St: Tensión de prueba hidrostática permitida (MPa).

1. Resumen Ejecutivo

Empresas Gasco S.A es una sociedad que lleva más de 165 años brindando soluciones energéticas a las distintas regiones de Chile. La empresa se ha expandido a distintos ámbitos, uno de los cuales es el suministro de calor a procesos mineros. Actualmente la compañía está desarrollando un proyecto para BHP, a ser instalado en la mina Escondida en la Zona Óxidos y Sulfuros. Dicho proyecto consiste en una planta termo solar que brinda la energía necesaria para el procesamiento del cobre “electrowinning”. Cuenta con distintos elementos fundamentales para su correcto funcionamiento, sin embargo, para términos de este informe se enfoca solamente en los tanques de almacenamiento.

El problema actual es que para los tanques no se definieron claramente las bases sísmicas en una etapa temprana del proyecto, lo cual tiene un impacto en la seguridad, el plazo y los costos. Considerando que Chile es un país sísmico, se requiere que todo tipo de estructuras estén diseñadas según las normativas locales e internacionales. En caso de no contar con la definición y validación de bases sísmicas, los tanques podrían sufrir daños y, en consecuencia, generar perjuicios económicos significativos.

El objetivo de este trabajo es crear y validar las bases sísmicas según la norma NCh2369 2003 y 2023, API650 y las especificaciones de BHP, con el fin de evitar un impacto en la seguridad, los costos y plazos del proyecto, además, en la continuidad operacional de la planta.

Para lo anterior, se realiza una matriz con los parámetros sísmicos especificados por los distintos desarrolladores del proyecto y las normas vigentes. Asimismo, se desarrolla un análisis de sensibilidad para obtener los parámetros sísmicos acorde a los criterios señalados y evaluar los costos alternativos. Se analizan distintos casos, obteniendo el espesor del manto y la altura de ola de los tanques, lo cual permite decidir junto a los participantes del proyecto, cuáles son los parámetros adecuados a las condiciones de la zona y las características de los tanques.

Conforme a lo anterior, este trabajo busca proporcionar una base para el diseño sísmico de los tanques, con el objetivo de cumplir con la seguridad requerida para este tipo de estructuras según la normativa vigente y además evitar un impacto tanto en los costos como en los plazos del proyecto.

Los objetivos planteados fueron cumplidos, lográndose un 100% de cumplimiento de la norma NCh2369, además, se consigue reducir los costos y plazos en un 6% y 15%, respectivamente.

Abstract

“Empresas Gasco S.A” is a society that has been providing energetic solutions to several regions in Chile for more than 165 years. The company has expanded into different areas, one of which is heating supply for mining process. Currently Gasco is working in a project for BHP, in “Mina Escondida” within the oxide and sulfide zones. This project consists in a thermal plant that provides the energy required for copper electrowinning process. The plant has some critical elements for its correct functioning; however, this report will focus only on storage tanks.

The current problem is that it was not clearly defined the seismic bases for the tanks in an early stage of the project, which has an impact in safety, deadline, and costs. Considering that Chile is a seismic country, it is required that every type of structure is designed based in local and international regulations. If there is not any definition or validation of the seismic bases, the tanks may overcome great damage and, in consequence, trigger significant economic issues.

The objective of this work is to create and validate the seismic bases according to NCh2369 2003 and 2023, API650 and the specifications of BHP, with the purpose to avoid an impact in safety, costs, and deadlines of the project, and, in the operational continuity of the plant.

For the above, it is carried out a matrix with the specified seismic parameters for the different parts of the project and the regulations mentioned previously. In addition, a sensibility analysis is developed to obtain the seismic parameters according to the indicated criteria and evaluate the alternative costs involved. Several cases are analyzed, obtaining the thickness of the shell and the height of the sloshing wave of the tank, which will allow to decide along with the participants of the project, what are the appropriate parameters to the conditions of the zone and the features of the tanks.

As stated above, this work seeks to provide a base for the seismic design of the tanks, to accomplish the required safety for this type of structure according to the regulations in force and to avoid an impact whether in the costs as in the deadlines of the project.

The stated objectives were achieved, attaining a 100% compliance with the standard NCh2369 2003. Furthermore, costs and deadlines are reduced by 6% and 15%, respectively.

2. Introducción

Empresas Gasco S.A es una sociedad chilena de soluciones energéticas fundada en 1856. Actualmente, es líder en el ámbito energético utilizando soluciones innovadoras. A lo largo de los años, la empresa se ha expandido a distintos ámbitos creando filiales en Chile y el extranjero. En el Anexo 1 se agrega más información de la empresa.

Actualmente, Gasco está desarrollando un proyecto para la empresa BHP, el cual consiste en el diseño y construcción de una planta solar térmica donde la energía producida por el sol se destina al procesamiento del cobre. Esta planta se lleva a cabo en dos lugares de la mina Escondida, ubicada en la Región de Antofagasta, en la parte de Óxidos y en Sulfuros. El plano de ubicación de ambas zonas se adjunta en el Anexo 2.

La planta utiliza paneles termo solares que captan la radiación y calientan un flujo de agua, transformando la energía solar a térmica. Este flujo se distribuye por las tuberías para luego ser almacenado en un tanque. En dicho tanque ocurre el proceso de estratificación, donde el agua caliente asciende por encima del frío y con la diferencia de calor entre la parte superior e inferior, se abastece al intercambiador de calor con la energía necesaria para el proceso de “electrowinning”, que corresponde a la última etapa del procesamiento del cobre. En la figura 2.1, se observa la planta que Gasco realizará para BHP.

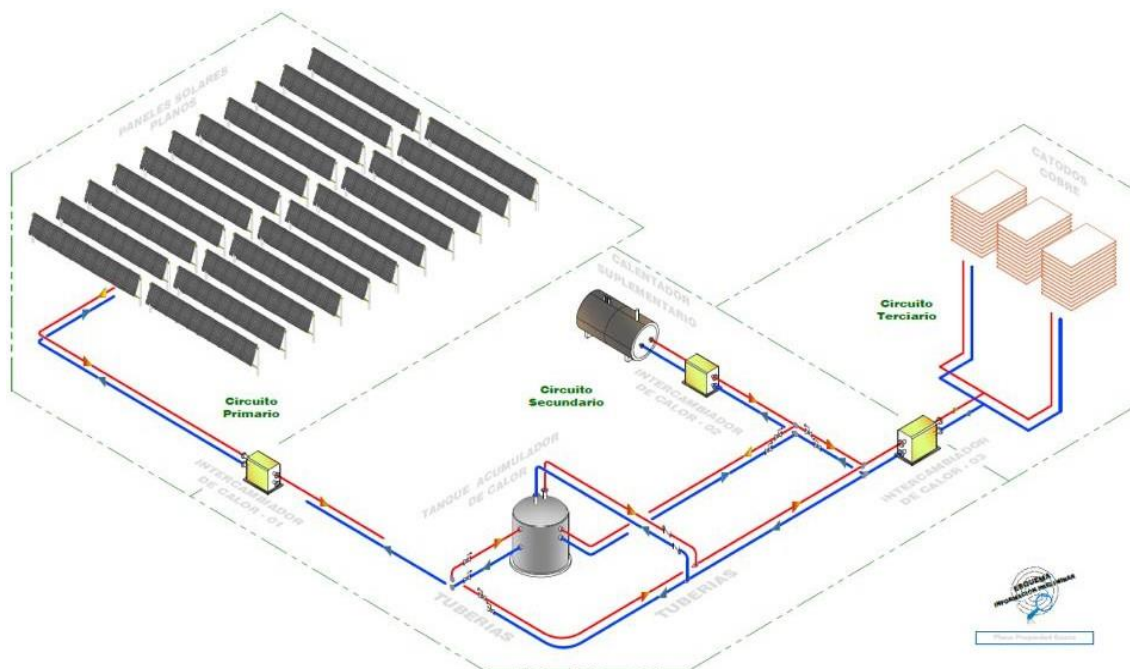


Figura 2.1: Planta de suministro de calor para el procesamiento del cobre

Para efectos de este trabajo, se analizan dos tanques cilíndricos verticales cuyas dimensiones son de D 26,2 m y H 30 m para la zona Óxidos y D 14,2 m y H 18 m para la zona de Sulfuros. La capacidad es de 15.000 m³ y 2.500 m³, respectivamente. Otro aspecto importante es que los tanques se fabricarán con planchas de acero al carbono (A36), las cuales serán soldadas en terreno por una empresa epcista (FW). Las fundaciones se construirán de hormigón en forma de anillo, a ser realizadas en sitio por una empresa constructora.

La problemática presente en este proyecto es que para el diseño de los tanques de almacenamiento no se definieron claramente las bases sísmicas, antes de la firma del contrato entre BHP y Gasco. Lo anterior implica un problema, ya que Chile es un país sísmico y cada estructura requiere un análisis riguroso conforme a la normativa vigente. Asimismo, si no se validan las bases sísmicas en una etapa temprana del proyecto (antes del inicio de la construcción), puede impactar el costo y el plazo de la ejecución. Por último, el tanque es un componente importante de la planta, por lo que se debe evitar que falle ante un sismo, para que así la continuidad operacional no se vea afectada. De esta manera, al tener bases sísmicas claramente definidas según la normativa, se logrará un diseño seguro y económico.

3. Objetivos

3.1 Objetivo SMART

Generar y validar las bases sísmicas de los tanques de almacenamiento, al ser instalados en la mina Escondida, basándose en la norma NCh2369, API650 y especificaciones de BHP, con el fin de analizar en términos de costos y plazo del proyecto, la detección oportuna de los parámetros de diseño que no concuerdan con la normativa.

3.2 Objetivos específicos

- Validar el cumplimiento de la norma NCh2369 2003 para los tanques de almacenamiento.
- Reducir el plazo de ejecución del proyecto, en comparación con uno sin bases sísmicas claramente definidas.
- Reducir los costos de construcción de los tanques, en comparación a un proyecto sin bases sísmicas claramente definidas.
- Mitigar el impacto en la continuidad operacional de la planta ante un evento sísmico.

4. Estado del Arte

Para efectos de este trabajo, se realiza una investigación de proyectos similares que tuvieron éxito al aplicar la normativa chilena e internacional. Por otro lado, se estudian casos nacionales e internacionales de tanques que presentaron fallas ante terremotos, incluyendo las mejoras que se han realizado a las normas y estándares a lo largo del tiempo. Finalmente, se investiga distintos estándares y códigos internacionales para compararlos con la NCh2369 2003 y 2023.

4.1 Casos de éxito

Uno de los casos de éxito, es el proyecto Pampa Elvira Solar, perteneciente a la división Gabriela Mistral de Codelco. En el año 2008 se inició con los estudios para realizar una planta termo solar similar a la que está desarrollando Empresas Gasco para BHP. Para dicha planta, se diseñó y construyó entre los años 2013 y 2014, un tanque de almacenamiento de 17 metros de alto, 17 metros de diámetro y capacidad de 4.000 m³, el cual almacena agua y abastece con calor necesario para el proceso de electrowinning. En el Anexo 3, se evidencia el tanque y la fundación que se construyeron para este proyecto. Para garantizar la seguridad ante un sismo, el diseño tiene que cumplir la norma NCh2369 y, además, utilizar el API650 para calcular sus distintos elementos.

El segundo caso de éxito corresponde al tanque de gas natural licuado (GNL) ubicado en Mejillones, Región de Antofagasta, el cual se adjunta en el Anexo 4. Su diseño y construcción, implicó un gran desafío debido a las dimensiones, siendo un diámetro externo de más de 90 m, altura de 50 m, capacidad de 175.000 m³ y temperatura de -170 °C. Además, la zona donde se encuentra ubicado corresponde a uno de los lugares con mayor riesgo sísmico. Para este diseño, se aplicaron estándares internacionales, por ejemplo, API620. Asimismo, se debía cumplir con las exigencias sísmicas de la norma chilena NCh2369.

4.2 Casos de fracaso

Con respecto a los casos de fracaso, se analiza el rendimiento de tanques de almacenamiento de distintas industrias que se vieron afectados por dos terremotos ocurridos en Chile, el de Algarrobo 1985 y el del Maule 2010.

En primer lugar, se estudia el terremoto de Algarrobo 1985, el cual tuvo una magnitud de 7.8 Mw y el epicentro fue en la costa central de la Región de Valparaíso. Una de las principales industrias afectadas fue la petrolera, donde tanques presentaron fallas, siendo las más comunes,

el pandeo del manto “pata de elefante”. En la tabla 4.2.1, se evidencian los tanques de la refinería de Concón que tuvieron daños debido al terremoto en cuestión.

Tanque	Contenido	G	D (m)	H (m)	Hmax (m)	V (m3)	t (mm)	D/H	Anclaje	Techo	Daños
1	Gasolina	0,75	12,96	12,2	11,3	1609	6,05	1,06	no	Flotante	PM
2	Gasolina	0,75	12,96	12,2	11,3	1609	6,05	1,06	no	Flotante	PM
3	Nafta	0,8	18,28	12,2	11,3	3202	8,15	1,50	no	Flotante	PM
4	Solvente	0,67	11,18	12,2	11,8	1198	6,45	0,92	no	Flotante	PM (1)
5	Fuel Oil	0,75	13,72	12,2	11,6	1804	7,45	1,12	no	Cónico	PM
6	Fuel Oil	0,75	11,18	12,2	11,6	1198	6,4	0,92	no	Cónico	PM
7	Slop	0,75	11,18	12,2	11,6	1198	7,25	0,92	no	Cónico	PM
8	Asfalto	0,75	18,28	12,2	11,6	3202	9,55	1,50	no	Cónico	PM
9	Kerosene	0,75	15,84	11,6	11,6	2286	7,94	1,37	no	Cónico	PM
10	Kerosene	0,75	15,24	9,75	9,2	1779	6,15	1,56	no	Cónico	PM
11	Kerosene	0,75	22,34	12,2	11,6	4782	11,15	1,83	no	Cónico	PM
12	Gasolina	0,75	22,4	12,2	11,3	4808	10,3	1,84	no	Cónico	S/D

Tabla 4.1: Características de tanques de la refinería de Concón durante el terremoto de 1985

Posterior al terremoto, se verificaron los diseños y se evidenció que los tanques no cumplían con los requisitos referidos a las tensiones en la pared del manto según lo que dicta la norma extranjera API650. Además, en ese tiempo no existía una norma chilena que regulara el diseño sísmico de los tanques de acero, por lo que la mayoría de ellos fueron realizados a partir del API650. Una de las observaciones que se hicieron luego del terremoto, fue que el pobre desempeño de los tanques se debía a que la norma extranjera no incorpora anclaje mecánico en el diseño, lo cual, para la condición sísmica de Chile, es importante debido a que los sismos en el país tienen un componente vertical significativo. A partir de lo anterior, se empezó con el estudio de la norma NCh2369 2003, la cual incorpora el anclaje mecánico y otros parámetros relevantes para el diseño de los tanques.

En segundo lugar, se investiga acerca del terremoto del Maule 2010, el que tuvo una magnitud de 8,8 Mw y el epicentro fue en el mar chileno, frente a la costa de la Región del Ñuble, en el cual se presentaron las siguientes fallas. Uno de los casos es un tanque de almacenamiento de agua potable (D 15.24 m y H 7.2 m) en el Aeropuerto de Santiago que colapsó debido a que no estaba anclado según las disposiciones de la norma chilena y tampoco cumplía con el espesor mínimo del manto según el API650, lo cual se evidencia en el Anexo 5. Otro caso es la refinería de ENAP en Talcahuano donde tanques presentaron daños menores y hubo derrames de petróleo debido al sobrellenado. Más ejemplos donde tanques tuvieron daños en dicho terremoto, se detallan en el Anexo 6.

A pesar de las fallas mencionadas, los tanques en el terremoto de 2010 presentaron un mejor desempeño que en el del 1985, debido a la existencia de una nueva norma NCh2369 2003, que regula el diseño sísmico de estructuras industriales e incorpora experiencias del pasado.

En base a los daños observados en el terremoto del 2010, se hicieron algunas propuestas para la normativa nacional, por ejemplo, redactar una norma transitoria que considere las enseñanzas del pasado, revisar los criterios de zonificación sísmica y clasificación del suelo, las cuales fueron incorporadas en la nueva versión de la NCh2369 2023.

Por otro lado, se investiga sobre casos internacionales donde tanques de distintas industrias fallaron, a pesar de haber basado sus diseños en los estándares y códigos correspondientes de cada país.

Son ejemplos, los terremotos del 2013 y 2016 en Nueva Zelanda, los cuales afectaron la industria vitivinícola, demostrando que sigue siendo vulnerable a los eventos sísmicos. Para el diseño de los tanques, se utilizó la guía de diseño sísmica de este país, sin embargo, se demostró que varios tanques no cumplían con ciertos aspectos de dicha guía. Comparando ambos terremotos, para el año 2013 se vieron afectados una mayor cantidad de tanques que el 2016, debido a que se mejoraron ciertos aspectos en el diseño que habían fallado en el año 2013.

4.3 Normas, estándares y códigos

En cuanto a las normas, estándares y códigos, se estudia la NCh2369 2003 y 2023, API650 y NSZEE 86, con el objetivo de determinar las principales diferencias entre ellas. Asimismo, se analizan los cambios realizados en la nueva versión de la norma chilena.

En primer lugar, se estudia la NCh2369 año 2003 y 2023, la cual regula el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. Luego el API650, que cubre el diseño y cálculo de distintos elementos del tanque. Por último, la guía NZSEE 86 cuyo objetivo es proporcionar pautas para el diseño sísmico de distintas estructuras en Nueva Zelanda, incluyendo tanques de almacenamiento.

La gran diferencia que existe entre estas normas es que los parámetros sísmicos son específicos para cada lugar, dependiendo de sus condiciones geográficas y sísmicas. Por ejemplo, la norma chilena establece una zona sísmica y una aceleración efectiva máxima correspondiente a las condiciones locales. La NZSEE 86, incluye información detallada sobre la selección de aceleraciones de diseño específicas para la situación sísmica del país. Por otra parte, el API650

define distintos métodos para obtener las aceleraciones laterales espectrales para zonas dentro de Estados Unidos y para lugares fuera de la región, se utiliza lo que establecen las normativas locales.

Con respecto a la nueva versión de la NCh2369, una de las modificaciones es la clasificación del tipo de suelo. Se cambia los parámetros de densidad, peso unitario y velocidad de propagación de onda de corte (V_s) por una clasificación según el periodo de vibrar del suelo y V_{s30} . Otro cambio es en los espectros de aceleración, en el cual se agrega uno de referencia, que sirve para determinar las amenazas sísmicas. También se modifica la fórmula utilizada para calcular los espectros de diseño, los cuales determinan las fuerzas sísmicas para los cálculos estructurales.

5. Metodologías

Para el desarrollo e implementación de este trabajo, se realizan múltiples pasos, los cuales se basan en metodologías establecidas por normas locales e internacionales y especificaciones de Gasco y BHP.

5.1 Normas y estándares

En el presente informe se realiza un estudio de la norma NCh2369 año 2003 y 2023. Asimismo, se analiza la norma extranjera API650 Apéndice E, el cual establece los requisitos y parámetros para el diseño sísmico de los tanques de almacenamiento. Lo anterior ayuda a identificar los parámetros sísmicos, criterios y fórmulas relevantes para el diseño.

5.2 Revisión especificaciones del proyecto

Se revisa las especificaciones de BHP, de la ingeniería conceptual de las fundaciones, oferta del tanquista y el diseño preliminar del tanque de 15.000 m³ (F.W). A partir de la revisión, se recopilan los parámetros establecidos en cada documento y se realiza una comparación de ellos.

5.3 Matriz con parámetros sísmicos

Una vez estudiada las normas y documentos mencionados anteriormente, se procede a la recopilación de los parámetros relevantes para el diseño sísmico de los tanques. Con esos datos, se realiza una matriz versión 0 que contiene las especificaciones de los documentos y normas señaladas en los puntos 5.1 y 5.2. En la tabla 5.1, se evidencia la matriz versión 0.

Luego se analiza si existen inconsistencias entre los parámetros establecidos en cada documento, a partir de lo cual, se realiza una propuesta de criterios a considerar en el diseño de los tanques.

Posteriormente, se revisan los parámetros establecidos junto a JEJ (empresa contraparte) y se realiza el análisis de sensibilidad para construir la matriz versión 1, la cual se adjunta en la tabla 5.2. Con el fin de detectar los cambios realizados con respecto a la primera matriz, se destacan los parámetros que fueron modificados.

Si se cumplen las especificaciones de BHP, de las normativas y además los costos del proyecto no se alteran significativamente, se utilizan los parámetros de la matriz 1 como definitivos para el diseño de los tanques y sus fundaciones. En caso contrario, se realiza la matriz versión 2.

	Especificaciones BHP			Ingeniería	Normas			FW		
Parámetros	3.4.17 Criterios	3.4.11 ESP	3.4.10 Design BHP	Ing Conceptual Edic	NCh2369 (2003)	NCh2369 (2023)	API650	Oferta F.W	Diseño Preliminar F.W	Definición
Zona sísmica	2	3	3	2	2	2	-	-	-	3
Ao (g)	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
Espectro	NCh2369	NCh433 y NCh2369	NCh433 y NCh2369	NCh2369				-	-	-
C. según importancia	-	-	C1	C2	C2	II y equivalente a C2 de 2003	C2	C2	C2	C2
C. de ocupación y operación	-	-	-	-	C2 y equivalente a II de 2003	II	-	-	II	II
SUG	-	-	-	I	-	-	I	I	I	I
I	-	-	1.2	1	1	1	1	1	1	1
Ri		-	-	4	4	4	4	-	4	4
Rc	-	-	-	-	1	1	2	-	2	1
Rv	-	-	-	-	3	2	-	-	-	2
ξ_i	-	-	-	0.02	0.02	0.02	0.05	-	0.05	0.02
ξ_c	-	-	-	-	0.005	0.005	0.005	-	0.005	0.005
ξ_v	-	-	-	-	0.03	0.03	-	-	-	0.03
Tipo de suelo	III según mec de suelos existente			Grava arcillosa	III	D	D	D	D	III
S	-	-	-	-	-	1.2	-	-	-	-
To (s)	-	-	-	-	-	0.75	-	-	-	-
T' (s)	-	-	-	-	0.62	0.52	-	-	-	0.62
n	-	-	-	-	1.8	-	-	-	-	1.8
p	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-

Tabla 5.1: Matriz versión 0

Parámetros	Especificaciones BHP	NCh2369 2003	Definición	Justificación
Zona sísmica	2	2	2	En acuerdo con BHP, se va a diseñar las estructuras para una zona sísmica 2.
Ao (g)	0.3	0.3	0.3	Aceleración correspondiente a la zona sísmica definida.
Espectro	NCh2369 2003	-	NCh2369 2003	Los espectros se realizan en base a la NCh2369 2003.
Clasificación según importancia	-	C2	C2	El tanque clasifica como una obra normal, que puede tener fallas menores y no causan detenciones prolongadas ya que la planta puede seguir funcionando con los paneles solares y calentadores.
SUG	-	I	I	El tanque no corresponde a una estructura crítica y no almacena un líquido que representa un peligro público.
I	-	1	1	A partir del análisis de sensibilidad, se define I=1.
Ri	-	4	4	Parámetros definidos según la norma NCh2369 2003.
Rc	-	1	1	
Rv	-	3	3	
ξi	-	0.02	0.02	
ξc	-	0.005	0.005	
ξv	-	0.03	0.03	
Tipo de suelo	Se necesita mecánica de suelos y clasificar el tipo de suelo según NCh2369 2003			
S				
To (s)				
T' (s)				
n				
p				

Tabla 5.2: Matriz versión 1 con justificación

5.4 Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de determinar los parámetros para el diseño sísmico, se realiza un análisis de sensibilidad obteniendo la variación del espesor de la chapa del tanque y la altura de ola. Se evalúan ocho casos cambiando la aceleración máxima, el tipo de suelo y el coeficiente de importancia, los cuales se definen en el Anexo 7. Es importante mencionar que el análisis se realiza para el tanque de 15.000 m³ y los parámetros obtenidos se aplicarán también al de 2.500 m³.

En primer lugar, se obtiene el espesor de la chapa del tanque utilizando el método “One Foot” del API 650, el cual se puede aplicar cuando sus diámetros son menores a 61 m, condición que cumplen los tanques a diseñar.

Para este cálculo, se divide el tanque en 12 virolas donde se determina el espesor de diseño (t-design), el de prueba hidrostática (t-test) y sísmica (t-seismic). Además, se considera el espesor requerido (t-erec) igual a 6 mm, definido por la normativa. De estos resultados se obtiene el máximo (t-min) y luego se verifica si cumple con el espesor instalado que se estableció preliminarmente.

En segundo lugar, se calcula la altura de ola utilizando las fórmulas establecidas en el API650. Debido a que los tanques se consideran un grupo sísmico (SUG) I, por razones económicas se recomienda utilizar un valor mínimo de $0.7\delta_s$, lo cual debe ser menor a la altura libre de 2 m según lo establecido por F.W. Los detalles del cálculo mencionado anteriormente y los resultados se encuentran en el Anexo 8. Los valores obtenidos fueron revisados por F.W, empresa contraparte especialista en diseño sísmico.

6. Solución escogida

La solución escogida fue elaborar y validar las bases sísmicas para el diseño de los tanques de almacenamiento, las cuales establecen los parámetros a considerar. Estas bases incluyen una matriz versión 0 y 1, además, de una propuesta para el diseño con la justificación correspondiente. El objetivo es evitar que existan inconsistencias entre las especificaciones de BHP, la norma NCh2369, API650 y las empresas encargadas de las fundaciones y tanques. Asimismo, se realiza un análisis de sensibilidad con ocho escenarios posibles para determinar cuánto varía el espesor del manto y la altura de ola de los tanques, al cambiar ciertos parámetros. El propósito de realizar este análisis es mitigar el impacto en los costos del proyecto

y también adelantar la ingeniería conceptual, a la espera de los resultados de la mecánica de suelos.

En relación con la elección de la norma a utilizar en el diseño, se establecen los parámetros según lo que dicta la NCh2369 2003, mientras que, para calcular los distintos elementos de los tanques, se aplica el API650. Es relevante guiarse por la norma chilena ya que es de cumplimiento obligatorio para las estructuras industriales. Asimismo, representa las condiciones geográficas y sismológicas del país y se ha construido a través de las experiencias de los terremotos pasados y los daños sufridos. En relación con la nueva versión de la norma chilena, se considera la clasificación del tipo de suelo y la especificación de realizar el sondaje de 30 m. La razón de lo anterior es que los mayores cambios normativos corresponden a la clasificación del tipo de suelo, ya que los daños ocurridos en el terremoto del 2010 no fueron por fallas estructurales, sino que principalmente por problemas en dicha clasificación. A pesar de que el contrato entre BHP y Gasco define que el diseño se realizará con la versión 2003, es importante considerar las mejoras de la norma actualizada.

7. Riesgos y mitigaciones

En relación con el análisis de riesgo y las mitigaciones necesarias para implementar de manera exitosa el proyecto, se realiza una matriz de riesgo con cinco categorías de impacto y probabilidad. En la tabla 7.1 se observa la definición de las categorías de impacto.

Objetivo	Nivel de impacto				
	Mínimo	Moderado	Serio	Elevado	Grave
Costo	Insignificante	< US\$125.000	< US\$250.000	< US\$500.000	< US\$1.000.000
Plazo	Insignificante	< 5%	5-10%	10-20%	> 20%

7.1 : Definición de las categorías de impacto

En primer lugar, se definen los niveles de impacto según el aumento de costo y plazo del proyecto para luego realizar la matriz de riesgo, la cual se evidencia en la tabla 7.2.

Probabilidad	Impacto				
	Mínimo	Moderado	Serio	Elevado	Grave
Frecuente	Aceptable	Tolerable	Alto	Alto	Alto
Recurrente	Aceptable	Aceptable	Tolerable	Alto	Alto
Posible	Bajo	Aceptable	Tolerable	Tolerable	Alto
Inusual	Bajo	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Tolerable
Remota	Bajo	Bajo	Bajo	Aceptable	Aceptable

Tabla 7.2: Matriz de riesgo

Luego se establecen los posibles eventos críticos durante la implementación del proyecto y se determina su nivel de riesgo. En la tabla 7.3 se observan dichos eventos.

N°	Evento	Probabilidad	Impacto	Nivel de riesgo
1	Aumento de costo al aplicar la norma al diseño de los tanques	Posible	Grave	Alto
2	Aumento de costo por cumplimiento especificaciones de BHP	Posible	Grave	Alto
3	Cambio en los parámetros de diseño de los tanques	Inusual	Moderado	Aceptable
4	Retraso en la mecánica de suelos	Posible	Elevado	Tolerable
5	Cambio en la definición del tipo de suelo	Inusual	Moderado	Aceptable
6	No tener toda la información para validar el cumplimiento de la normativa	Posible	Moderado	Aceptable

Tabla 7.3: Eventos y su nivel de riesgo

Para los eventos 1, 2 y 3 que se relacionan con el aumento de costos por cumplimiento de especificaciones y cambio en ciertas definiciones, se realiza un análisis de sensibilidad con los parámetros establecidos en la matriz versión 0 como forma de mitigación. Esta evaluación considera la metodología expuesta en el punto 5.4.

En cuanto a los eventos 4 y 5, relacionados a la clasificación del tipo de suelo, la forma de mitigar estos eventos considera en primer lugar, tomar como referencia la mecánica de suelos de zonas cercanas al proyecto. Luego se solicita a la empresa Edic (empresa encargada del diseño de las fundaciones) que realice un análisis de sensibilidad con los casos expuestos en el Anexo 7, para evaluar cuanto varían los m³ de hormigón y las toneladas de acero de las fundaciones. El objetivo de lo anterior es que, al momento de tener la mecánica de suelos, ya se hayan considerado todos los posibles escenarios, de manera tal que no existan grandes cambios en la ingeniería de detalles.

Por último, para mitigar el evento 6 se utiliza como referencia parámetros de proyectos diseñados en condiciones similares. De esta manera, se podrá contar con un estudio preliminar a la espera de obtener la información definitiva del proyecto, evitando mayores retrasos en el proceso de implementación.

8. Evaluación Económica

Con el objetivo de evaluar económicamente el proyecto, se analizan dos escenarios posibles, la inversión sin bases sísmicas vs con bases. Se calcula la inversión inicial en cada caso y se trae a valor actual utilizando una tasa de interés anual de 9% (tasa mensual 0,75%). La utilización de esta metodología se debe a que la solución escogida tiene un impacto en la inversión inicial y no en los costos de puesta en marcha, de operación y de ingresos.

En primer lugar, se detallan los costos que forman parte del presupuesto inicial del proyecto para las dos plantas que se construirán en la Mina Escondida. En la tabla 8.1 se evidencia los costos y el periodo de tiempo en que se pagarán.

Material	Inversión (US\$)	Fecha de pago (meses)
Diseño y construcción de tanques	\$8.000.000	20
Fundaciones	\$3.000.000	8
Mecánica de suelos	\$300.000	2

Tabla 8.1: Inversión para la construcción de los tanques y fecha de pago

En relación con el proyecto sin bases sísmicas, se simula un caso hipotético donde se realizan los diseños con las inconsistencias ya señaladas, generando el rechazo de la ingeniería por parte de BHP. En este escenario, se deben ejecutar nuevamente los diseños de las fundaciones y de los tanques, con un costo extra aproximado de US\$500.000 y un retraso de tres meses. En la tabla 8.2 se evidencian los costos y el atraso debido a no tener las bases definidas en una etapa temprana del proyecto.

Costo sin bases sísmicas		
Material	Inversión (US\$)	Fecha de pago (meses)
Diseño y construcción de tanques	\$8.250.000	23
Fundaciones	\$3.250.000	11
Mecánica de suelos	\$300.000	2

Tabla 8.2 Costos y fecha de pago proyecto sin bases sísmicas

De acuerdo con lo anterior, el proyecto sin bases sísmicas tiene una inversión inicial de US\$11.800.000, cuyo valor actual equivale a US\$9.936.781, considerando un periodo de 23 meses y la tasa de interés mencionada anteriormente.

Por otro lado, el proyecto con bases sísmicas ha logrado un ahorro en los costos de las fundaciones en las dos plantas de un 20% de m3 de hormigón, lo que equivale aproximadamente a US\$200.000. El costo en el diseño de los tanques se mantiene constante ya que con el análisis de sensibilidad no cambiaron los milímetros de espesor del manto. Las fechas de pago no sufrieron cambios. En la tabla 8.3 se evidencia la inversión considerando la implementación del proyecto con bases sísmicas.

Costo con bases sísmicas		
Materiales	Inversión (US\$)	Fecha de pago (meses)
Diseño y construcción de tanques	\$8.000.000	20
Fundaciones	\$2.800.000	8
Mecánica de suelos	\$300.000	2

Tabla 8.3: Costos y fecha de pago proyecto con bases sísmicas

De acuerdo con lo anterior, el proyecto con bases sísmicas tiene una inversión inicial de US\$11.100.000, cuyo valor actual equivale a US\$9.559.207, considerando un periodo de 20 meses y la tasa de interés mencionada anteriormente.

Comparando las dos situaciones, se evidencia que al aplicar las bases sísmicas en una etapa temprana del proyecto se consigue reducir la inversión y en consecuencia un ahorro aproximado de US\$450.000, por lo tanto, se justifica crear y validar las bases de acuerdo con la normativa vigente y las especificaciones de BHP.

9. Medidas de desempeño

- Cumplimiento de la norma chilena NCh2369 2003.

Se calcula el porcentaje de cumplimiento de la norma, a través de la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Cumplimiento} = \frac{N^{\circ} \text{ Parámetros del diseño que cumplen}}{N^{\circ} \text{ Parámetros definidos por la norma}} \cdot 100$$

- Plazo del diseño y construcción del tanque.

Se determina el % de variación en el plazo del proyecto sin bases sísmicas comparado a uno con bases, utilizando la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Plazo} = \frac{(\text{Plazo sin bases sísmicas} - \text{Plazo con bases sísmicas})}{\text{Plazo con bases sísmicas}} \cdot 100$$

- Costos en la construcción del tanque.

Se calcula la variación porcentual del costo del proyecto sin bases sísmicas claramente definidas y con bases establecidas en una etapa temprana, la cual se obtiene mediante la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Costo} = \frac{(\text{Costo sin bases sísmicas} - \text{Costo con bases sísmicas})}{\text{Costo con bases sísmicas}} \cdot 100$$

- Impacto en la continuidad operacional de la planta.

Se mide la diferencia de tiempo de reparación del tanque sin bases sísmicas versus con bases, para analizar el impacto en la continuidad operacional de la planta ante una falla generada por un sismo. Para cuantificar lo anterior, se utiliza la siguiente fórmula.

$$\Delta \text{Tiempo de reparación} = T. \text{ sin bases} - T. \text{ con bases}$$

10. Desarrollo del proyecto

El plan de implementación consiste en un proceso iterativo, del cual se obtienen los parámetros definitivos para el proyecto. El objetivo de este proceso es evitar sobredimensionar el diseño y, por lo tanto, prevenir que los costos aumenten considerablemente. Además, se requiere de la revisión y aprobación de los parámetros por parte de BHP para que el diseño de los tanques cumpla con las especificaciones de la empresa.

El primer paso consiste en realizar la matriz versión 0, la cual contiene las especificaciones de las distintas partes que participan en el proyecto, las normativas locales y extranjeras. A partir de las definiciones especificadas en cada documento, se revisan los resultados junto a la empresa JEJ. Se evidencian inconsistencias en el factor de modificación de la respuesta horizontal convectiva y la razón de amortiguamiento, parámetros que no concuerdan entre la norma NCh2369 2003 y API650. Asimismo, la aceleración máxima y coeficiente de importancia presentan discrepancias entre la normativa chilena y las especificaciones de BHP. Estos parámetros se evalúan en el análisis de sensibilidad considerando valores de $A_0=0.3g$ (norma chilena) y $A_0=0.4g$ (especificaciones de BHP), y para el coeficiente se utiliza $I=1.2$ e $I=1$. La clasificación del tipo de suelo queda pendiente ya que no hay una mecánica exacta en la zona de construcción del tanque, sin embargo, se tomó como referencia un estudio cercano al lugar del proyecto, el cual indica que hay presencia de tipo suelo II y III, según la NCh2369 2003. Con

respecto a los otros parámetros, no se evidencian inconsistencias por lo que se mantuvo la definición según la norma chilena.

Posteriormente, se realiza el análisis de sensibilidad considerando los parámetros mencionados anteriormente. Además, se solicita a Edic que realice el mismo análisis, obteniendo los m³ de hormigón y toneladas de acero de las fundaciones. El objetivo es avanzar con la ingeniería conceptual según la información disponible, de manera tal que se pueda obtener un conocimiento aproximado de los costos, mientras se tienen los resultados de la mecánica.

Dentro de los resultados obtenidos, no se evidencian cambios significativos en los espesores y en la altura de ola. Sin embargo, los m³ de hormigón y toneladas de acero si varían en cada caso, impactando los costos del proyecto. Con esos valores, se toma la decisión de utilizar en el diseño un $I=1$ y una aceleración de $A_o=0.3g$, parámetros que fueron aceptados por BHP.

El siguiente paso corresponde a realizar la matriz versión 1 con los resultados del análisis. Dicha matriz se revisa junto a JEJ y se establecen los parámetros definitivos para el diseño de los tanques.

Para efectos de este trabajo, se realiza hasta la matriz versión 1 sin una clasificación exacta del tipo de suelo, el cual corresponde al único parámetro por definir. De todas formas, se cuenta con el análisis de sensibilidad que sirve para adelantar los posibles escenarios. Respecto a los otros parámetros, quedaron definidos según la norma NCh2369 2003 y especificaciones de BHP.

11.Resultados

En relación con el resultado cualitativo, se consigue el objetivo de lograr la seguridad de los tanques ante eventos sísmicos, al cumplir con la norma NCh2369 2003 en su totalidad. En un principio, existían tres inconsistencias según lo indicado en el punto 10, lo cual representa un cumplimiento normativo de 77%, implicando un problema de seguridad. Luego, al desarrollar la matriz versión 0 y 1 se logra un 100% de cumplimiento de la normativa local para el tanque de zona Óxidos y Sulfuros. Este resultado es preliminar ya que se necesita la clasificación del tipo de suelo para completar las matrices en su totalidad.

Para los objetivos de plazo y costo, se supone una situación hipotética de proyecto sin bases sísmicas en el cual BHP puede rechazar los diseños y por ende se deba rehacer la ingeniería,

implicando un impacto en estos objetivos. Es importante mencionar que la evaluación se realiza para el diseño y construcción del tanque y las fundaciones, y no para el proyecto global.

El primer resultado cuantitativo consiste en disminuir el plazo al aplicar las bases sísmicas. Lo anterior se logra ya que, si se hubiese continuado con las inconsistencias detectadas, el plazo aumentaría en un 15% en comparación a un proyecto con bases. El impacto estimado sería de dos meses en la ingeniería y uno en la construcción de los tanques y fundaciones.

El segundo resultado cuantitativo, dice relación con la disminución de la inversión comparado entre un proyecto con bases sísmicas y sin bases, logrando reducir la inversión inicial en un 6%. Esto se explica en el desarrollo del análisis de sensibilidad, donde se consigue disminuir en un 20% los m³ de hormigón, lo cual equivale aproximadamente a US\$200.000. Asimismo, si BHP rechaza el diseño por ausencia de bases, se debe realizar nuevamente la ingeniería implicando un costo de US\$500.000.

Finalmente, se logra mitigar el impacto en la continuidad operacional de la planta ya que, al definir las bases sísmicas, la probabilidad de falla ante un terremoto es menor en comparación a un proyecto sin bases. Tomando como referencia el proyecto Pampa Elvira Solar, Codelco, el tanque de esta planta tuvo una falla por corrosión, sin embargo, se siguió produciendo normalmente. En relación con esta experiencia, la planta podría funcionar cuatro meses sin el tanque, pero si no se logra reparar en ese periodo, BHP debe recurrir al calentador secundario implicando un mayor consumo de electricidad verde, lo cual genera multas y penalizaciones para Gasco.

12. Conclusiones

Durante el desarrollo y la implementación de las bases sísmicas al diseño de los tanques, se pueden establecer las siguientes conclusiones.

Los objetivos propuestos se logran, ya que se generan y validan las bases sísmicas de los tanques de almacenamiento, cumpliendo en un 100% la norma NCh2369 2003 y especificaciones de BHP.

Sin embargo, para el desarrollo de las bases sísmicas no existió una definición de la clasificación del tipo de suelo al no contar con una mecánica correspondiente a la zona exacta de la construcción de los tanques. Si bien inicialmente implica un desafío, se pudo mitigar al realizar un análisis de sensibilidad del tanque y las fundaciones, avanzando en la ingeniería conceptual

con ocho casos distintos. De esta forma, al tener la mecánica de suelos, se puede continuar con la ingeniería de detalle ya teniendo en conocimiento cuanto significa en términos de mm del espesor del tanque, m³ de hormigón y toneladas de acero para las fundaciones, en el caso de que se presente un tipo de suelo II o III.

En relación con los costos y plazos, al aplicar las bases sísmicas se consigue reducir en un 6% y 15%, respectivamente.

Con respecto a la continuidad operacional, se mitiga el impacto ya que al implementar las bases al diseño de los tanques se obtiene una probabilidad menor de falla ante un evento sísmico.

Realizar este trabajo fue un desafío tanto en lo personal como profesional ya que además de aplicar los conocimientos adquiridos en la universidad fue necesario estudiar nuevos conceptos y normativas, en un proyecto de la empresa, resolviendo problemas inesperados y tomando las decisiones con la información disponible. Adicionalmente, se tuvo la oportunidad de trabajar en grupo e insertarse en el mundo laboral aprendiendo de las metodologías y de otros ámbitos dentro de la Ingeniería Civil en Obras Civiles, que no se vieron en profundidad durante la carrera.

Finalmente, desarrollar las bases para los tanques de almacenamiento de la mina Escondida fue relevante en términos de la ética que debe estar presente en los proyectos, considerando que la aplicación correcta de la norma tiene directa relación con la seguridad de las personas cercanas a la zona y con la mitigación de daños al medio ambiente.

13. Recomendaciones

Considerando que Gasco está empezando un proyecto similar de diseño y construcción de una planta termo solar para la Mina Spence, BHP, ubicado en la Región de Antofagasta, se recomienda replicar las metodologías utilizadas para que las bases sísmicas queden definidas desde el origen, evitando así riesgos de seguridad, incumplimiento normativo, mayores costos y plazos, entre otros.

Por otro lado, para evitar las inconsistencias señaladas a lo largo del informe, se recomienda a la empresa contar con un equipo técnico que coordine a los distintos actores involucrados en el proyecto y revise que los diseños a desarrollar se ajusten a las especificaciones del cliente y a la normativa vigente.

14. Anexos

Anexo 1: Información de Empresas Gasco S.A

Empresas Gasco S.A es una sociedad chilena de amplia trayectoria, siendo pionera en el suministro de energía en la Región Metropolitana. Actualmente cuenta con distintas filiales, por ejemplo, Gasco Magallanes, INERSA, Gasco luz, entre otras.

En el año 2022, la cantidad de trabajadores eran 1.876 y las ventas consolidadas ascendieron a 533.832 MM\$ Nominales.

El plan estratégico con miras al 2026, es “Facilitar los sueños de las personas, dando acceso a la mejor energía, mediante soluciones innovadores y a la medida de sus necesidades”. La empresa busca crecer creando valor a través del desarrollo de nuevos negocios energéticos en base a fuentes renovables, como lo es caso del proyecto BHP.

Anexo 2: Plano de ubicación de la planta termo solar en la mina Escondida

En la siguiente figura se observa el plano de ubicación de la planta termo solar zona Óxidos (Ox).



Asimismo, se adjunta el plano de ubicación de la planta termo solar zona Sulfuros (Sx).



Anexo 3: Tanque de almacenamiento y su fundación del proyecto Pampa Elvira Solar, Codelco.



Anexo 4: Tanque de almacenamiento de GNL ubicado en Mejillones, Región de Antofagasta.



Anexo 5: Tanque de almacenamiento de agua potable del Aeropuerto de Santiago.

En el terremoto del Maule 2010, el tanque de almacenamiento del Aeropuerto de Santiago colapsó debido a que no estaba anclado según las disposiciones de la normativa local y extranjera.



Anexo 6: Fallas en el manto del tanque “pata de elefante” y “punta de diamante”.

A pesar del buen rendimiento de los tanques en las distintas industrias, la vitivinícola fue una de las más afectadas por el terremoto del 2010, alcanzando pérdidas de aproximadamente 125 millones de litros de vino (250 millones de US\$). Las fallas más comunes fueron el pandeo en el manto “pata elefante” y “punta de diamante”. La razón del pobre desempeño de los tanques de esta industria se debe al deficiente diseño y técnicas de construcción.

La falla de pandeo global del manto llamado “pata de elefante”, ocurre debido a las altas demandas de los esfuerzos compresivos verticales en el manto, lo cual se observa en la siguiente figura.



La falla de pandeo local del manto llamado “punta de diamante”, ocurre debido a que las máximas tensiones compresivas están concentradas en torno a regiones con alguna singularidad, como, por ejemplo, cambio de espesor, anclajes, etc. A continuación, se evidencia lo mencionado.



Anexo 7: Casos a evaluar en el análisis de sensibilidad.

Para el análisis de sensibilidad se evalúan 8 posibles escenarios, los cuales son:

- Caso 1: $A_0=0,3g$; $I=1.2$; Tipo de Suelo II
- Caso 2: $A_0=0,3g$; $I=1$; Tipo de Suelo II
- Caso 3: $A_0=0,3g$; $I=1$; Tipo de Suelo III
- Caso 4: $A_0=0,3g$; $I=1.2$; Tipo de Suelo III
- Caso 5: $A_0=0,4g$; $I=1$; Tipo de Suelo II
- Caso 6: $A_0=0,4g$; $I=1.2$; Tipo de Suelo II
- Caso 7: $A_0=0,4g$; $I=1$; Tipo de Suelo III
- Caso 8: $A_0=0,4g$; $I=1.2$; Tipo de Suelo III

Se analiza el cambio de tres parámetros debido a que los otros ya se encuentran definidos. De dichos casos, el 1 corresponde al menos restrictivo y el 8 al más conservador.

Anexo 8: Cálculos y resultados de análisis de sensibilidad

En primer lugar, se calcula el período impulsivo y convectivo para ambos tanques utilizando las fórmulas establecidas en el API650.

Tanque	Período	
	Impulsivo (s)	Convectivo (s)
15.000 m ³	0,40	5,33
2.500 m ³	0,22	3,92

Tabla 14.1: Período Impulsivo y Convectivo

Luego se obtienen los coeficientes sísmicos según el API650 y la norma NCh2369, con el fin de modificar los resultados respecto a las condiciones locales.

Para el análisis sísmico de los tanques se debe considerar la respuesta horizontal impulsiva, que consiste en una porción del líquido que se mueve rígidamente con el tanque y el suelo, experimentando la misma aceleración que ellos. También se evalúa la respuesta horizontal convectiva, donde las partículas líquidas cerca de la superficie oscilan verticalmente formando olas, moviéndose con un período mucho mayor que el impulsivo. Por otro lado, la aceleración de la acción vertical es igual a $2/3$ del coeficiente sísmico impulsivo.

		Coeficientes sísmicos		
	Norma	Impulsivo (g)	Convectivo (g)	Vertical (g)
Caso 1	API650	0.25	0.14	0.39
	NCh2369 2003	0.24	0.04	0.16
Caso 2	API650	0.21	0.12	0.39
	NCh2369 2003	0.24	0.04	0.16
Caso 3	API650	0.23	0.13	0.42
	NCh2369 2003	0.24	0.04	0.16
Caso 4	API650	0.27	0.16	0.42
	NCh2369 2003	0.24	0.043	0.16
Caso 5	API650	0.25	0.15	0.47
	NCh2369 2003	0.32	0.06	0.21
Caso 6	API650	0.30	0.17	0.47
	NCh2369 2003	0.32	0.06	0.21
Caso 7	API650	0.28	0.16	0.52
	NCh2369 2003	0.32	0.06	0.21
Caso 8	API650	0.33	0.19	0.52
	NCh2369 2003	0.32	0.06	0.21

Tabla 14.2: Coeficientes sísmicos según API650 y NCh2369

Al tener los coeficientes se puede empezar a calcular el espesor del manto del tanque a través del método One-Foot para los ocho escenarios posibles. El t-design y t-test no varían ya que dependen exclusivamente de las propiedades de los materiales y características del tanque. El espesor que se modifica es el t-seismic ya que depende de los coeficientes de aceleración. En las siguientes tablas se adjuntan los cálculos y resultados.

Course	Height (m)	JE	Fy (Mpa)	Sd (Mpa)	St (Mpa)	t-erec (mm)	t-design (mm)	t-test (mm)
12	2.5	1	275	145	145	6	0.36	0.33
11	2.5	1	275	145	145	6	2.31	2.16
10	2.5	1	275	145	145	6	4.27	3.98
9	2.5	1	355	188	201	6	5.43	5.08
8	2.5	1	355	188	201	6	7.14	6.68
7	2.5	1	355	188	201	6	8.85	8.27
6	2.5	1	355	188	201	6	10.55	9.87
5	2.5	1	355	188	201	6	12.26	11.47
4	2.5	1	355	188	201	6	13.97	13.06
3	2.5	1	355	188	201	6	15.68	14.66
2	2.5	1	345	188	201	6	17.38	16.26
1	2.5	1	345	188	201	6	19.09	17.86

Tabla 14.3 Propiedades del material y espesores del manto.

En la tabla 13.3 se observan las propiedades del material, con las cuales se calculan los espesores t_{desing} y t_{test} , los que son independientes a las condiciones sísmicas.

Posteriormente, se obtiene el espesor t_{seismic} para los distintos casos evaluados en el análisis de sensibilidad, para así determinar el t_{min} en cada escenario. Lo anterior se evidencia en la tabla 13.4.

Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4		
t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)	t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)	t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)	t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)
1.0	6.0	6.0	0.9	6.0	6.0	0.9	6.0	6.0	1.1	6.0	6.0
2.5	6.0	6.0	2.4	6.0	6.0	2.5	6.0	6.0	2.6	6.0	6.0
4.3	6.0	8.0	4.2	6.0	8.0	4.3	6.0	8.0	4.4	6.0	8.0
5.4	6.0	8.0	5.3	6.0	8.0	5.4	6.0	8.0	5.5	6.0	8.0
6.9	7.1	8.0	6.9	7.1	8.0	6.9	7.1	8.0	7.1	7.1	8.0
8.5	8.8	9.0	8.4	8.8	9.0	8.5	8.8	9.0	8.6	8.8	9.0
10.0	10.6	11.0	9.9	10.6	11.0	10.0	10.6	11.0	10.2	10.6	11.0
11.4	12.3	13.0	11.4	12.3	13.0	11.5	12.3	13.0	11.6	12.3	13.0
12.8	14.0	14.0	12.8	14.0	14.0	12.9	14.0	14.0	13.1	14.0	14.0
14.3	15.7	16.0	14.2	15.7	16.0	14.4	15.7	16.0	14.5	15.7	16.0
15.7	17.4	18.0	15.7	17.4	18.0	15.8	17.4	18.0	15.9	17.4	18.0
17.1	19.1	20.0	17.1	19.1	20.0	17.3	19.1	20.0	17.4	19.1	20.0
Caso 5			Caso 6			Caso 7			Caso 8		
t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)	t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)	t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)	t-seismic (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)
1.0	6.0	6.0	1.2	6.0	6.0	1.1	6.0	6.0	1.3	6.0	6.0
2.6	6.0	6.0	2.7	6.0	6.0	2.7	6.0	6.0	2.8	6.0	6.0
4.6	6.0	8.0	4.6	6.0	8.0	4.6	6.0	8.0	4.7	6.0	8.0
5.7	6.0	8.0	5.7	6.0	8.0	5.8	6.0	8.0	5.8	6.0	8.0
7.4	7.4	8.0	7.4	7.4	8.0	7.4	7.4	8.0	7.5	7.5	8.0
9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.1	9.1	9.0
10.5	10.6	11.0	10.5	10.6	11.0	10.6	10.6	11.0	10.7	10.7	11.0
12.0	12.3	13.0	12.0	12.3	13.0	12.1	12.3	13.0	12.2	12.3	13.0
13.5	14.0	14.0	13.5	14.0	14.0	13.6	14.0	14.0	13.6	14.0	14.0
14.9	15.7	16.0	14.9	15.7	16.0	15.1	15.7	16.0	15.1	15.7	16.0
16.4	17.4	18.0	16.4	17.4	18.0	16.5	17.4	18.0	16.6	17.4	18.0
17.8	19.1	20.0	17.8	19.1	20.0	18.0	19.1	20.0	18.1	19.1	20.0

Tabla 14.4: Análisis de sensibilidad para el espesor del manto del tanque de 15.000 m3.

15. Referencias

1. API Standard 650 (2003), "Welded Steel Tanks for Oil Storage", American Petroleum Institute, 1220 L Street, Washington D.C., USA.
2. Instituto Nacional de Normalización (2003), NCh 2369 Of. 2003 y 2023 "Diseño sísmico de estructuras industriales", Santiago de Chile.
3. Pineda, P., Saragoni, G. R., & Arze, E. (2012, January). Performance of steel tanks in Chile 2010 and 1985 earthquakes. In STESSA 2012: Proceedings of the 7th international conference on behaviour of steel structures in seismic areas. Santiago, Chile.
4. Pineda, P., & Saragoni, G. R. (2003). Backward seismic analysis of steel tanks. In 8th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas.
5. Herrera, R., & Beltrán, J. F. (2012). Performance of steel structures during the February 27, 2010, Chile earthquake. 15th WCEE.
6. Almazán, J. L. (2010). Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del Maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile. Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, 7(2&3)
7. Beilic, D. (2015). Seismic performance of storage steel tanks during the May 2012 Emilia, Italy, earthquakes. Journal of Performance of Constructed Facilities, 29(5), 04014137.
8. Yazdanian, M., Ingham, J., Kahanek, C., Cradock-Henry, N., Fountain, J., & Dizhur, D. (2020). Analysis of damage data collected for wine storage tanks following the 2013 and 2016 New Zealand earthquakes.
9. Sanzana, V. M. S. (2011). 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. Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile).
10. González Pisani, E. P. (2014). Análisis del daño observado en estanques de acero inoxidable para vino durante el terremoto del Maule del 02/27/2010 y recomendaciones para mejorar el diseño de estas estructuras.
11. NZSEE. (2009). Seismic Design of Storage Tanks, 2009: Recommendations of a Study Group of the New Zealand Society for Earthquake Engineering.
12. Ruiz, D. P., Morena, F. V., & Gutiérrez, S. G. (2017). Diseño sísmico del tanque de gas natural licuado en Mejillones, Chile. Hormigón y Acero, 68(281), 21-30.