



**Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico**

**Propuesta Metodológica: Análisis de Riesgo en el
Terminal 2 de Puerto de Valparaíso ante el escenario de
1730, para la elaboración de estrategias de continuidad**

Pablo Andrés Pedraza Cabrera

Noviembre 2017

Propuesta Metodológica: Análisis de Riesgo en el Terminal 2 de Puerto de Valparaíso ante el escenario de 1730, para la elaboración de estrategias de continuidad

Pablo Andrés Pedraza Cabrera

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

FELIPE CASELLI
Profesor guía

MAURICIO REYES
Docente

DIEGO MORENO
Docente

Noviembre 2017

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

FELIPE CASELLI
PROFESOR GUÍA

PABLO PEDRAZA
AUTOR

*Dedicado a Alfonso Pedraza y Erick Cabrera
Un saludo al Cielo*

Agradecimientos

Primero debo agradecer a mi Familia, fundación y forzante del hombre que soy hoy en día.

*A mi Padre Ernesto, quien me ha inculcado la perseverancia
y resiliencia en momentos de adversidad.*

A mi Madre Erika, quien anidó e incentivó todo sueño que tuve por delante.

*A mi Hermano Felipe, por ser compañero y amigo
en tantas buenas y malas de la vida.*

*Al amor de mi vida Claudia, por ser fuente de energía y amor
incondicional, quien además me entregó apoyo a lo largo de este proceso.*

*A mi Padrino Rodrigo por presentarme este emocionante y basto mundo
de la ingeniería, además de siempre colaborar en mi formación.*

A mis abuelas, Tiyi y Mamé, por estar siempre pendientes y presentes.

A mi familia de Quilpué/Olmué por permitir pasar parte de mi formación en sus hogares.

A mi Madrina Blanca por su patrocinio y apoyo constante en los detalles importantes.

Sin ustedes no estaría aquí.

*Sin la colaboración de Felipe Caselli,
mi inicio en esta área de la ingeniería no hubiera sido posible,
gracias por ser un guía, colega y alguien en
quién pude depositar mi confianza*

*A lo largo de mi vida he podido conocer mucha gente que de alguna
u otra forma, han sido parte de este proceso. Mis
amigos de la vida, Mis Xatos, quienes siempre me
han entregado una risa cuando no la pido, gracias por estar siempre presente y
ser a la fecha grandes hermanos.*

*En la Universidad he podido conocer a grandes personas,
Dania, Carlos, Estivalia, Gonzalo, Víctor, Sandy
con quienes pasé grandes momentos fuera y dentro de la Universidad.
Vicente y Felipe, a quienes hoy les puedo decir
grandes amigos y “colegas” en un futuro próximo.
No puedo dejar al Equipo de FEUV 14’ y 15’,
Pablo, Catalina, Darío, Christian, Francisca y Walter en ustedes pude
conocer excelente personas, profesionales y amigos,
gracias por permitirme crecer junto a ustedes en mi vida política/universitaria.*

*A Diego Moreno y TCVAl por proporcionar los espacios y recursos
necesarios para elaborar esta investigación.*

*Por último, al equipo de GHD, quienes me han ayudado tanto en el proceso de esta
memoria como en los primeros pasos de mi formación profesional*

Contenido

1. Introducción	1
2. Objetivos, Alcances y Limitaciones	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
2.3. Alcances	2
2.4. Limitaciones	2
3. Marco Teórico.....	3
3.1. Riesgo de desastre	3
3.1.1. Amenaza	3
3.1.2. Vulnerabilidad	3
3.2. Sistema de gestión de continuidad de negocio.....	4
3.3. Plan de continuidad de negocios (BCP).....	4
3.4. Escenarios disruptivos	6
3.4.1. Terremoto.....	6
3.4.2. Tsunami	10
3.5. Análisis de riesgo	11
3.5.1. Matriz de riesgo.....	11
3.5.2. Estimación de daños.....	12
4. Descripción del terminal 2	21
4.1. Descripción general sitios de ataque	21
4.2. Descripción de estructuras sobre el espigón	22
4.2.1. Contenedores tipo oficina	22
4.2.2. Cafetería y panel eléctrico central.....	24
4.2.3. Descripción de maquinaria.....	25
4.2.4. Zonas de trabajo	27
5. Metodología.....	28
5.1. Estimación de daños	28
5.1.1. Riesgo por terremoto	28
5.1.2. Riesgo por Tsunami	30
6. Selección Amenaza.....	31
6.1. Sismo	31
6.2. Tsunami.....	31
7. Análisis de Riesgo - Sismo.....	33
7.1. Recopilación de Antecedentes.....	33
7.1.1. Informe de estabilidad grúas (propiedad de TCVAL).....	33
7.1.2. Informe de Puerto de Iquique (DOP)	33

7.1.3.	Resumen de informes Privados, Puertos de la Octava Región (DOP)	33
7.1.4.	ATC-13 “Earthquake damage evaluation data for California”	33
7.1.5.	NCEER-ATC joint Study on Fragility of Buildings, Anagnos, et. Al. (1995) ..	33
7.2.	Clasificación ATC de estructuras más importantes del espigón	34
7.3.	Matriz de probabilidad de daño	34
7.4.	Curvas de fragilidad	36
7.5.	Análisis de resultados	41
7.5.1.	Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura (Clasificación ATC = 4).....	41
7.5.2.	Grúas (Clasificación ATC = 53)	42
7.5.3.	Estructuras de frente marino (Clasificación ATC =63)	43
7.5.4.	Equipo de Oficina (Clasificación ATC =65)	44
7.5.5.	Equipo Eléctrico (Clasificación ATC =66)	45
8.	Análisis de Riesgo - Tsunami	46
8.1.	Recopilación de antecedentes	46
8.1.1.	Informe de estabilidad grúas (propiedad de TCVAL).....	46
8.1.2.	Informe de modelación de tsunامي en la costa de Valparaíso (Propiedad de TCVAL) 46	
8.1.3.	Informe de Puerto de Iquique (DOP)	46
8.1.4.	Resumen de informes Privados, Puertos de la Octava Región (DOP)	46
8.1.5.	Tsunami-induced Debris of Freight Containers due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Kento KUMAGAI	46
8.1.6.	Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan Tsunami, Anawat Suppasri.....	47
8.2.	Matrices de daño.....	47
8.2.1.	Generación de matrices de daño	47
8.2.2.	Resultados	48
8.3.	Curvas de fragilidad	50
8.4.	Análisis de resultados	59
8.4.1.	Grúa Gottwald	59
8.4.2.	Oficina Contenedor – Carga Ligera	60
8.4.3.	Contenedor 40’ – Pila Individual – Vacía	61
8.4.4.	Contenedor 40’ – Pila Individual – Con Carga	62
8.4.5.	Contenedor 40’ – Pila Doble – Vacía	63
8.4.6.	Contenedor 40’ – Pila Doble – Con Carga.....	64
8.4.7.	Cafetería – Panel Eléctrico	65
8.4.8.	Sitio 8 – Panel Eléctrico	66
9.	Conclusiones.....	67

9.1.	Análisis de riesgo – Sismo	67
9.1.1.	Sobre los Antecedentes	67
9.1.2.	Sobre la Metodología	67
9.1.3.	Sobre los resultados	68
9.2.	Análisis de riesgo – Tsunami	69
9.2.1.	Sobre los Antecedentes	69
9.2.2.	Sobre la Metodología	70
9.2.3.	Sobre los resultados	70
9.3.	Generalidades	72
9.4.	Recomendaciones.....	72
9.4.1.	Método Delphi.....	72
9.4.2.	Fema-P695	73
9.4.3.	Análisis de elementos finitos – Software FLIP	73
9.4.4.	Estudio de Erosión y socavación	73
10.	Referencias.....	74
11.	ANEXOS	76
Anexo A - Parámetro de forma, distribución Beta para cada magnitud - Sismo		76
Anexo B - Distribución Beta de cada Instalación - Sismo.....		78
Anexo C - Matrices de probabilidad acumulada - Sismo.....		81
Anexo D - Matrices de probabilidad acumulada - Tsunami.....		83

Índice de tablas

Tabla 3-1	Magnitud Richter v/s Efectos del sismo.....	7
Tabla 3-2	Escala de MMI-PGA	8
Tabla 3-3	Resumen de estados de daño.....	13
Tabla 3-4	- Relación entre la intensidad de propuesta por Papadopoulos y Shuto.....	16
Tabla 3-5	Nivel de daños, clasificación, descripción y condición de las estructuras/recursos	17
Tabla 3-6	Condiciones de contenedores	18
Tabla 7-1	Clasificación ATC para estructuras del Espigón	34
Tabla 7-2	Matriz de probabilidad de daño basado en opinión de expertos para instalaciones con diseño sísmico	35
Tabla 7-3	Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 4	36
Tabla 7-4	Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 53	37
Tabla 7-5	Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 63	38
Tabla 7-6	Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 65	39
Tabla 7-7	Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 66	40
Tabla 8-1	Matrices de daño por recurso/estructura.....	48
Tabla 8-2	Parámetros de distribución LogNormal para Grúa Gottwald.....	50
Tabla 8-3	Parámetros de distribución LogNormal para Oficina Contenedor - Carga ligera	51
Tabla 8-4	Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40' – Pila Individual – Vacía.....	52

Tabla 8-5 Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40' – Pila Individual – Con Carga	53
Tabla 8-6 Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40' – Pila Doble – Vacía	54
Tabla 8-7 Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40' – Pila Doble – Con Carga	55
Tabla 8-8 Parámetros de distribución LogNormal para Cafetería – Panel Eléctrico	56
Tabla 8-9 Parámetros de distribución LogNormal para Sitio 8 – Panel Eléctrico	57
Tabla 8-10 Parámetros de distribución LogNormal para Oficinas – Zona de Ingreso	58

Índice de Ilustraciones

Ilustración 3-1 Modelo PDCA aplicado al proceso de BCMS	4
Ilustración 3-2 Mapa conceptual - Elaboración BCP	5
Ilustración 3-3 Matriz de riesgo por terremoto - Ejemplo	12
Ilustración 3-4 Curva de Fragilidad a partir de opinión de expertos	13
Ilustración 3-5 Algoritmo proceso de opinión de expertos	14
Ilustración 3-6 Matriz de probabilidad de daño para un bastidor de madera de baja altura	15
Ilustración 3-7 Distribución Beta típica, elaborada para cada instalación y nivel de MMI ..	16
Ilustración 3-8 Curvas de fragilidad para el tsunami de 2004 en Banda Aceh, Indonesia .	17
Ilustración 3-9 Formulación de boyantes y Diagrama de fuerzas de equilibrio para contenedor Pila Doble	19
Ilustración 3-10 Relación profundidad de inundación y fuerza boyante	19
Ilustración 4-1 Terminal 2, Puerto de Valparaíso	21
Ilustración 4-2 Bloques inclinados Sitio 8	22
Ilustración 4-3 Sitio 7, Cajón más bloque de coronamiento	22
Ilustración 4-4 Contenedor utilizado como oficina	23
Ilustración 4-5 Dos contenedores en vertical utilizado como oficina	23
Ilustración 4-6 Cafetería	24
Ilustración 4-7 Panel eléctrico	24
Ilustración 4-8 Vehículo de carga	25
Ilustración 4-9 Sitio 7 en proceso de carga	25
Ilustración 4-10 Grúa Gottwald GHMK	26
Ilustración 4-11 Zona de ingreso	27
Ilustración 4-12 Sector de oficinas	27
Ilustración 6-1 Campo de Velocidades en Tierra - Prof. de inundación = 2 [m]	32
Ilustración 7-1 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 4 - Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura	36
Ilustración 7-2 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 53 - Grúas	37
Ilustración 7-3 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 63 – Estructuras de Frente Marino	38
Ilustración 7-4 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 65 – Equipo de Oficina	39
Ilustración 7-5 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 66 – Equipo Eléctrico	40
Ilustración 7-6 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 4 - Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura – Escenario 1730	41
Ilustración 7-7 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 53 - Grúas	42
Ilustración 7-8 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 63 – Estructuras de Frente Marino	43
Ilustración 7-9 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 65 – Equipo de Oficina	44

Ilustración 7-10 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 66 – Equipo Eléctrico.....	45
Ilustración 8-1 Curva de Fragilidad - Grúa Gottwald	50
Ilustración 8-2 Curva de Fragilidad – Oficina Contenedor – Carga ligera	51
Ilustración 8-3 Curva de Fragilidad – Contenedor 40’ – Pila Individual - Vacía.....	52
Ilustración 8-4 Curva de Fragilidad – Contenedor 40’ – Pila Individual – Con Carga.....	53
Ilustración 8-5 Curva de Fragilidad – Contenedor 40’ –Pila Doble – Vacía.....	54
Ilustración 8-6 Curva de Fragilidad – Contenedor 40’ –Pila Doble – Con Carga	55
Ilustración 8-7 Curva de Fragilidad – Cafetería – Panel Eléctrico	56
Ilustración 8-8 Curva de Fragilidad – Sitio 8 – Panel Eléctrico.....	57
Ilustración 8-9 Curva de Fragilidad – Oficinas – Zona de Ingreso.....	58
Ilustración 8-10 Análisis de Fragilidad – Grúa Gottwald.....	59
Ilustración 8-11 Análisis de Fragilidad – Oficina Contenedor – Carga Ligera	60
Ilustración 8-12 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40’ – Pila Individual – Vacía	61
Ilustración 8-13 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40’ – Pila Individual – Con Carga....	62
Ilustración 8-14 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40’ – Pila Doble – Vacía.....	63
Ilustración 8-15 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40’ – Pila Doble – Con Carga.....	64
Ilustración 8-16 Análisis de Fragilidad – Cafetería – Panel Eléctrico	65
Ilustración 8-17 Análisis de Fragilidad – Sitio 8 – Panel Eléctrico	66

1. Introducción

Por los puertos del país circula el 95% del comercio internacional, que a su vez corresponde al 63% del PIB nacional (SATREPS Chile Working Group 4b, 2016). En consecuencia, el mercado debe interactuar constantemente con amenazas antropogénicas¹ y naturales, siendo estas últimas las que generan más daño a la infraestructura portuaria, afectando directamente a los sectores involucrados con el puerto.

Es necesario desarrollar Planes de Continuidad de Negocios para asegurar la capacidad de recuperación y normal desarrollo de las actividades portuarias a los “*Stakeholders*”² del puerto. Para ello se requiere un análisis de riesgo que permita hacer una asignación eficaz y eficiente de las estrategias de recuperación

El presente documento exhibe la propuesta metodológica para realizar un análisis de riesgo en el Terminal Cerros de Valparaíso, ante un desastre por terremoto y tsunami, como insumo para el desarrollo de estrategias de continuidad de sus operaciones; donde se identifican los recursos más importantes y su tiempo de recuperación esperado, otorgando al puerto las herramientas básicas para la elaboración de planes de continuidad. Una forma de valorizar la probabilidad de daño sobre estructuras o recursos es elaborando curvas de fragilidad en las que, para cada parámetro del escenario disruptivo correspondiente a Terremoto y Tsunami, existe una probabilidad para un cierto nivel de daño.

A continuación, se presentan los objetivos, antecedentes y propuesta metodológica para la elaboración de estas curvas y su posterior aplicación en el análisis de riesgo en uno de los terminales más importantes de la región.

¹ Referido a efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas (RAE, 2016)

² Partes interesadas en una organización

2. Objetivos, Alcances y Limitaciones

2.1. Objetivo general

Proponer una metodología para análisis de riesgo en el terminal 2 de Puerto de Valparaíso, cuantificando la probabilidad de daño con curvas de fragilidad, ante los escenarios disruptivos: Sismo y Tsunami

2.2. Objetivos específicos

- Definir escenarios de terremoto y tsunami con mayor probabilidad de ocurrencia en la bahía de Valparaíso.
- Aplicar una metodología cualitativa que permita la elaboración de curvas de fragilidad de diferentes recursos e instalaciones portuarias.
- Identificar, analizar y evaluar el riesgo, asociados a los escenarios disruptivos, de las principales estructuras y recursos del Terminal 2 del Puerto de Valparaíso.
- Analizar los resultados de la metodología, encontrar falencias y proponer alternativas de mejora para futuros estudios en la región.

2.3. Alcances

El terminal 2 de EPV³, concesionado por la empresa TCV⁴, tiene en la actualidad un plan de expansión. Durante la investigación, el nuevo proyecto no se encontraba disponible para su difusión, teniendo que considerar como zona de estudio el espigón en su situación actual de servicio.

Los escenarios disruptivos se limitarán a terremoto y tsunami, siendo el peor caso para cada uno de ellos de manera independiente. Esto es debido a la complejidad que tiene el considerar ambos escenarios en simultáneo aumentando las variables a considerar.

2.4. Limitaciones

Los recursos seleccionados para someter al análisis de riesgo son considerados las instalaciones de mayor importancia para el negocio del puerto, no obstante, no se realizó un análisis exhaustivo de ellos debido a que no es objeto del presente estudio.

³ Empresa Portuaria Valparaíso

⁴ Terminal Cerros de Valparaíso

3. Marco Teórico

A continuación, se presenta el estado del arte en materia de riesgo: su definición, gestión, análisis y valorización.

3.1. Riesgo de desastre

La Real Academia Española define riesgo como la “Contingencia o proximidad de un daño” (Real Academia Española, 2014). Su definición no logra abarcar todas las variables cuando se habla de riesgo de desastre. UNESCO entrega una definición más completa incorporando conceptos como probabilidad de daño, pérdidas esperadas, peligros (naturales o antropogénicos) y vulnerabilidad (UNESCO, 2013). Todas estas variables pueden ser medidas y gestionadas con el fin de conocer en detalle los riesgos a los que está sometida una organización, pudiendo así, identificar los recursos más vulnerables ante los desastres que supone un riesgo (ISO, 2009).

Para este trabajo se utilizará la definición de Vargas (2002) ,quien señala que riesgo de desastre como la magnitud probable de daño en algún sector en específico, en alguno de sus componentes o subsistema para cierto período de tiempo, y ante la precedencia de una actividad con un peligro potencial asociado.

Entonces, según Vargas, el riesgo de desastre tiene dos componentes que deben ser definidas: la amenaza potencial y la vulnerabilidad del sistema ante dicha amenaza.

3.1.1. Amenaza

Se entiende como amenaza al fenómeno peligroso definiéndolo como “la magnitud y duración de una fuerza o energía potencialmente peligrosa por su capacidad de destruir o desestabilizar un ecosistema o los elementos que los componen, y la probabilidad de que esa energía se desencadene” (Vargas, 2002) desde un punto de vista natural.

Para valorizar la amenaza, se identifican 3 componentes para su análisis: la energía potencial de la actividad, su detonador o desencadenante y la probabilidad de ocurrencia de esta.

3.1.2. Vulnerabilidad

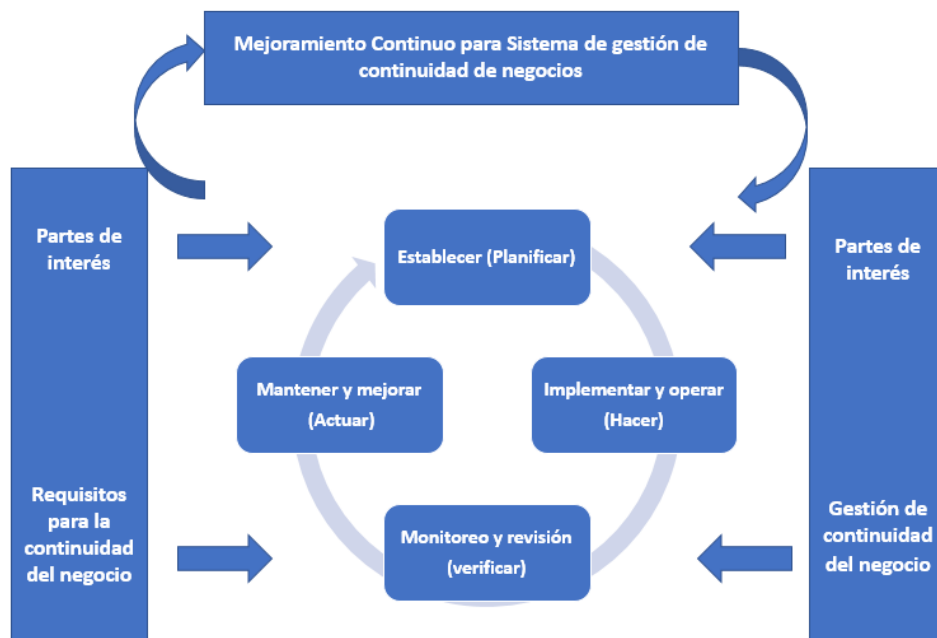
La vulnerabilidad es la disposición de un sistema a ser dañado ante la presencia de una amenaza potencial. el daño o las pérdidas son directamente proporcional a la vulnerabilidad del sistema y su magnitud depende de 5 factores que pueden ser medidos (Vargas, 2002): el grado de exposición, la protección del recurso, la capacidad de reacción, su recuperación esencial para su subsistencia y la reconstrucción para recuperar el equilibrio normal.

3.2. Sistema de gestión de continuidad de negocio

Identificando los componentes del riesgo asociados a una organización, se pueden elaborar planes de mitigación o de continuidad de negocios, que son utilizados una vez acontece el escenario disruptivo. Y es en este ámbito que la ISO 22301:2012 proporciona los requisitos con los que se deben contar para asegurar los intereses y necesidades de los Stakeholders⁵ ante cualquier adversidad (ISO, 2012).

El modelo PDCA (Deming, 1982) aplicado al algoritmo de BCMS⁶ (Ilustración 3-1) propone el procedimiento basado en la mejora continua de un sistema de solución. Para su implementación es necesario que la organización cuente con un equipo a cargo del sistema de gestión, que identifique los requerimientos y procedimientos, asegurando la continuidad del negocio de las partes de interés, ante los escenarios disruptivos que pueda tener la organización.

Ilustración 3-1 Modelo PDCA aplicado al proceso de BCMS



Fuente: Traducido de ISO 22301:2012

3.3. Plan de continuidad de negocios (BCP)

En el marco de la necesidad de un BCMS, es que autores como Martínez (2010) y Virgo (2010) entregan nociones de cómo elaborar planes de continuidad de negocios. El documento "BCP⁷ Guidelines for Chilean Ports" (SATREPS Chile Working Group 4b, 2016) presenta una guía para la elaboración de BCP en puertos de Chile, que incorpora la experiencia chilena - japonesa, respecto de la investigación realizada en el puerto de Iquique, lo que incluye el contenido de guías extranjeras (ISO 22.3001:2012, BS 25.999-2

⁵ Partes interesadas en una organización

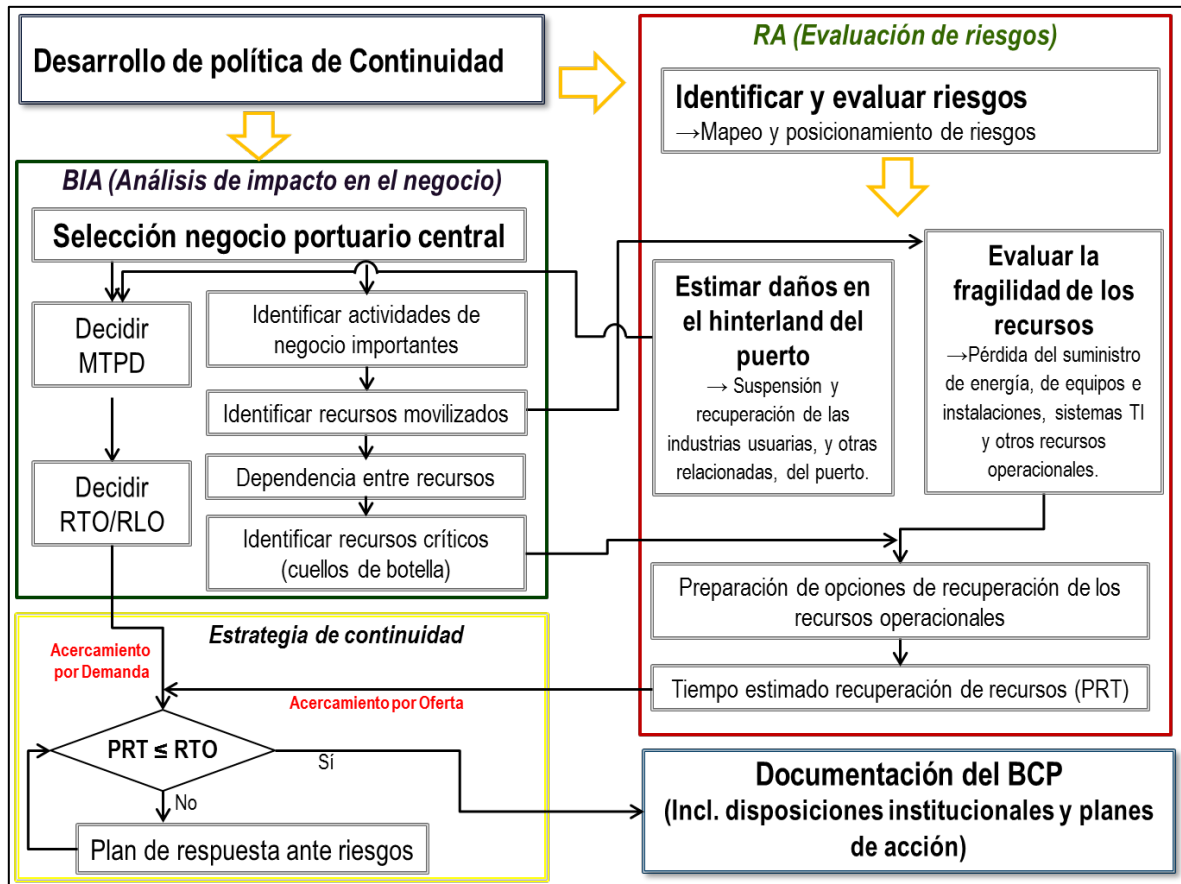
⁶ Business Continuity Management System

⁷ Business Continuity Plan

del *British Standards Institution*, “Business continuity management” del Gobierno Japonés, entre otras).

De acuerdo con esta metodología y en concordancia con los estándares internacionales, un requisito fundamental para el desarrollo de BCP es la realización de un análisis de riesgo ante distintas amenazas que puedan generar un evento disruptivo, de acuerdo con lo que se puede observar en la Ilustración 3-2.

Ilustración 3-2 Mapa conceptual - Elaboración BCP



Fuente: SATREPS Chile Working Group 4b (2016)

3.4. Escenarios disruptivos

Los escenarios disruptivos a los que está sometida toda organización dependen del contexto y ambiente en el que están inmersas. Un BCMS certificado debe identificar y priorizar toda las amenazas potenciales y probables a las que está sometida la organización.

En el presente proyecto se consideró dos amenazas naturales a las están sometidos los puertos de Chile: terremotos y tsunamis; principalmente por el gran nivel de daño que pueden generar, debido a su alto impacto en las estructuras en función de la cantidad de energía liberada. A continuación, se explican en mayor detalle.

3.4.1. Terremoto

Un terremoto es la vibración de la Tierra producida por una rápida liberación de energía. Es común que sean generados por deslizamientos de la corteza terrestre. La energía es liberada en todas las direcciones desde su origen, foco o hipocentro, en forma de ondas (Tarbuck, 2005).

El conocer el tipo de falla es importante para poder calcular la probabilidad de ocurrencia de sismos, su intensidad, velocidad de propagación, entre otras informaciones. Kious (1996) recapitula los 3 tipos de interacciones entre sus bordes, generados por los constantes deslizamientos de las placas. Estos pueden ser divergentes, convergentes o transformantes.

El tipo de límite con mayor presencia en el territorio chileno, entre las latitudes 18°S y 47°S, es convergente, donde la placa de Nazca subducta debajo de la placa Sudamericana (Madariaga, 1998) esto se refiere a una placa se posiciona bajo otra, donde la más densa subduce bajo la menos densa.

Una forma de relacionar eventos sísmicos, realizar comparaciones entre estos y hacer estudios probabilísticos, es calculando la magnitud (energía liberada) o intensidad del suceso (percepción del daño).

3.4.1.1. *Magnitud de un Sismo*

La magnitud es la valoración de la cantidad de energía liberada en forma de ondas, considerando las amplitudes y periodos de las ondas primarias (P) y secundarias (S) tomadas directamente de un sismograma. Haciendo uso de escalas logarítmicas, diversos autores ((Kanamori, 1977); (Gutenberg B. &, 1956); (Richter, 1935)) desarrollaron cálculos de la magnitud de momento, energía o compresión de estos escenarios siendo la Escala Sismológica de Richter la más utilizada.

La Escala sismológica de Richter, o más bien conocida como Escala de Magnitud Local, es una escala elaborada por Charles Francis Richter y Beno Gutenberg en 1935, con el objetivo de categorizar eventos de menor tamaño separándolos de los más significativos en un determinado sector del sur de California. Esta escala se basa en la máxima amplitud registrada por un sismógrafo de torsión Wood-Anderson con un periodo natural de 0.8 segundos y calcula su magnitud utilizando una escala logarítmica (Barragán, 2012).

En la actualidad se han ejecutado actualizaciones a esta metodología otorgando mayor precisión en cálculos para terremotos de mayor magnitud, debido a las limitantes del sismógrafo utilizado por Richter. Hanks y Kanamori (Kanamori, 1977) definen la magnitud de momento, reconocida como la actualización de Richter (1935), que entrega valores de mayor magnitud sin sufrir saturación y es independiente del tipo de instrumento con el que se obtienen los datos. En la actualidad esta es la escala que se utiliza con mayor frecuencia a nivel mundial, pero el público en general suele confundirla con la escala de Richter que, si bien tienen características similares, no entregan valores análogos en escalas superiores a 7.0 (Peláez, 2011).

A lo largo de los años, se han realizado esfuerzos para relacionar los efectos de los terremotos con la magnitud de momento; sin embargo, se ha logrado una baja precisión debido a que el daño puede depender de diversos factores como el tipo de falla, dirección y aceleración máxima del sismo. En la Tabla 3-1 se puede observar la relación entre la escala de Richter y el efecto del sismo. El daño debido a un escenario sísmico es relativo a la tipología estructural, materialidad y método constructivo, siendo necesario valorizar el daño en función de variables que permitan valorizar las averías provocadas por el sismo.

Tabla 3-1 Magnitud Richter v/s Efectos del sismo

Magnitud Escala Richter	Efecto del Sismo
Menos de 3.5	Generalmente no se siente, pero es registrado
3.5 a 5.4	A menudo se siente, pero sólo causa daños menores
5.5 a 6.0	Ocasiona daños ligeros a edificio
6.1 a 6.9	Puede ocasionar daños severos en área donde vive mucha gente
7.0 a 7.9	Terremoto mayor. Causa Graves Daños
8.0 o superior	Gran Terremoto. Destrucción total a comunidades Cercanas

Fuente www.Shoa.cl/servicios/tsunami/escalas.htm

3.4.1.2. Escala de Intensidad

Las escalas de intensidad se caracterizan por el tamaño de un terremoto a través del daño que se logra percibir en la superficie. Las más utilizadas modernamente son la Medever, Sponheuer y Karnik (MSK) y la Intensidad de Mercalli Modificada (MMI).

La escala de MSK es la utilizada de forma preferente en Europa, propuesta por Medvedev, Sponhuer y Kernik (Medvedev, 1977), se basa en la recopilación de daños por sismos en Europa y tiene 12 grados de daño por evento.

La escala modificada de Mercalli está basada en lo propuesto por Mercalli (1904), la que fue modificada por Neewmann (1932) y Richter (1956) (Musson, 2010). Al igual que la escala MSK, tiene 12 grados de intensidad referidas al efecto que producen los movimientos del suelo alrededor del epicentro.

De manera similar al caso de la Escala de Richter, existe dificultad en relacionar la escala de MMI con valores de energía y/o aceleración máxima del sismo. No obstante, es posible relacionar, de una forma aproximada la escala de MMI con un rango de aceleración máxima esperada (PGA) como muestra la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Escala de MMI-PGA

Grado	Nombre	Descripción	PGA [cm/s ²] ó GAL
I	Muy débil	Imperceptible y de efectos marginales	Menos de 1
II	Débil	Perceptible solo por algunas personas en reposo y/o aquellas que se encuentren ubicadas en pisos superiores.	1 - 2
III	Leve	Perceptible en interiores, observando leves movimientos en objetos y vibraciones similares a la que genera un vehículo ligero al pasar	2 – 5
IV	Moderado	Se observa mayores movimientos de objetos en interiores y vibraciones similares a la que genera un vehículo pesado al pasar	5 – 10
V	Poco Fuerte	Se percibe en el exterior, casi a una escala regional/nacional. Piezas de vasijas o cristales de ventanas se rompen y caen objetos inestables.	10 – 25
VI	Fuerte	Gran Terremoto. Destrucción total a comunidades Cercanas	25 – 50
VII	Muy Fuerte	Percibida a escala Nacional. Muebles pesados cambian de sitio y se observan daños leves en construcciones de material ligero	50 - 100
VIII	Destruccion	Daños leves en estructuras especializadas y de mayor consideración en estructuras ordinarias. Posibilidad de derrumbes	100 – 250
IX	Muy Destruccion	Daño estructural en instalaciones especializadas, edificios desplazados fuera de las bases	250 – 500
X	Desastroso	Daños en muros, vigas y fundaciones. Algunas estructuras de madera, puentes, vías ferroviarias, diques y taludes presentan signos de destrucción.	500 – 1000
XI	Muy Desastroso	Daños en carreteras y vías de conexión. Tuberías y alcantarillado con problemas graves	**
XII	Catastrófico	Desplazamiento de Rocas de gran tamaño, objetos saltan al aire, las personas no logran ponerse en pie y alta probabilidad de fatalidad	**

Fuente: (Richter, Elementary Seismology, 1958)

** a niveles mayores de intensidad el potencial de daño se determina por los efectos de falla del suelo. La mayoría de los tipos de suelo son incapaces de sostener aceleraciones mayores a los 500 Gal.

3.4.1.3. **Espectro de diseño NCh2369**

Debido a que los eventos sísmicos en Chile son recurrentes, se han establecido normas chilenas que estipulan las bases para el diseño sísmico en estructuras de carácter habitacional e industrial. Los puertos al ser considerado de alta importancia y riesgo económico en caso de colapso son diseñados con la norma NCh2369.

La norma chilena NCh2369 del 2003, de diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, propone un análisis elástico dinámico utilizando un espectro de diseño de pseudo - aceleraciones, para determinar la resistencia sísmica de la estructura ante un escenario adverso (NCh2369, I. N. N., 2003). Lo anterior, en función de la importancia de la instalación, el tipo de suelo, geometría, periodo fundamental de la estructura y su razón de amortiguamiento. El espectro está definido por:

Ecuación 3-1 Espectro de diseño sísmico

$$S_a = \frac{2.75 A_0 I \left(\frac{T'}{T}\right)^n \left(\frac{0.05}{\xi}\right)^{0.4}}{R}$$

Donde:

- Sa : Aceleración de diseño espectral
- I : Coeficiente asociado a la importancia y uso del edificio.
- A₀ : Aceleración efectiva máxima, que es determinada de acuerdo con la zona sísmica.
- T', n : Parámetros relativos al tipo de suelo de fundación.
- T : Período de vibración del modo considerado.
- R : Factor de modificación de la respuesta.
- ξ : Razón de amortiguamiento.

3.4.1.4. **Probabilidad de ocurrencia (periodo de retorno)**

Gutenberg y Richter (Gutenberg B. U., 1954) hacen notar la disminución en la frecuencia de los sismos a medida que aumenta su magnitud, asimismo, definen N(M) como el número de terremotos de una magnitud M o mayor por unidad de tiempo (1 año) en una determinada región y dan la fórmula:

Ecuación 3-2 Formula de Gutenberg y Richter (1954)

$$\text{Log } N(M) = a - bM$$

Donde a y b son constantes determinadas a través de un ajuste de mínimos cuadrados

Otros autores como Olivera (Oliveira, 1974) y Lomnitz (Lomnitz, 1966) sugieren un análisis probabilístico a los datos de observación, pues no es posible predecir un terremoto en función del tiempo, lugar e intensidad. La probabilidad de que ocurra un terremoto M en un período N de años, se puede calcular sirviéndose de la Teoría de Valores Extremos ideada por Gumbel (Gumbel E. J., 1960). Si se conoce una función inicial de distribución F(X) donde X es una variable aleatoria representada por la magnitud del sismo, se puede derivar la distribución exacta de los valores extremos. Usando formas asintóticas de distribuciones, cuando no se conoce la función inicial, Gumbel presenta 3 tipos de distribuciones, siendo una de estas la que mejor ajusta en este caso:

Ecuación 3-3 Formula de Gumbel

$$F(X) = \text{Exp} \left(- \left(\frac{w - X}{w - v} \right)^k \right)$$

Donde :

$k > 0$ $x < v$ $v < w$
 w : Límite superior de los valores máximos
 v : Valor Característico más grande
 k : Parámetro de forma de Gumbel

3.4.2. Tsunami

Otro de los escenarios disruptivos que fueron considerados en el proyecto fue el de Tsunami. UNESCO define un Tsunami como una serie de ondas marinas de longitud y periodo de gran escala, generado por perturbaciones rápidas y de gran magnitud, causada entre otros, por terremotos inter - placa asociados a zonas de subducción (UNESCO, 2013). Con el fin de caracterizar el daño por tsunami se hace imprescindible detallar los parámetros hidrodinámicos del tsunami además de los criterios de selección del escenario de la amenaza.

3.4.2.1. Características físicas de un Tsunami

Longitud de onda

Los tsunamis tienen longitudes que distan mucho de los valores que pueden tener olas generadas por grandes tormentas que alcanzan valores hasta los 300 metros de longitud. En cambio, una onda de tsunami puede tener longitudes de 50 hasta los 1000 kilómetros. Este valor corresponde al producto entre la velocidad de propagación (V) y el período (T) como indica la Ecuación 3-4 (Ramírez, 1986).

Ecuación 3-4 Longitud de onda

$$L = V \times T$$

Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de un tsunami depende de la profundidad oceánica a la que se encuentre la onda. Estas al ser de gran longitud, tienen un comportamiento como el oleaje de baja profundidad (aguas someras) rigiéndose por el efecto de refracción a lo largo del Pacífico. Este efecto provoca un aumento en la altura de la onda y disminuciones graduales en su longitud y velocidad en función del descenso de profundidad (Ramírez, 1986). En consecuencia, la velocidad de propagación puede ser calculada como:

Ecuación 3-5 Velocidad de propagación

$$V = \sqrt{gd}$$

Donde:

g : Aceleración de gravedad
 d : Profundidad

Para el Océano Pacífico la profundidad media es de 4.000 metros, por lo que la velocidad de propagación promedio es de 713 km/hrs

Profundidad de inundación

La profundidad de inundación de un tsunami depende directamente de los parámetros mencionados anteriormente y la energía que este contenga. Es posible que, para una misma onda, distintas localidades registren diferentes profundidades debido a la interacción que tuvo la onda larga con el fondo, antes de llegar a la costa.

3.4.2.2. Selección de Evento

Los autores de “Guía para la Estimación de Peligro de Tsunami” (SATREPS-Tsunami, 2016), proponen dos líneas de información para la selección del escenario disruptivo. La primera supone que el tsunami que ocurrirá es de similar magnitud al máximo del que se tenga registro. La segunda alternativa analiza terremotos históricos y escenarios de futuros sismos probables, para modelar y evaluar numéricamente el tsunami que genera cada caso.

3.5. Análisis de riesgo

De acuerdo con lo señalado anteriormente el análisis de riesgo es el estudio que identifica y evalúa la probabilidad de ocurrencia de un escenario disruptivo y las fragilidades a la que está sometida la organización o recurso, obteniendo el daño que estas puedan recibir.

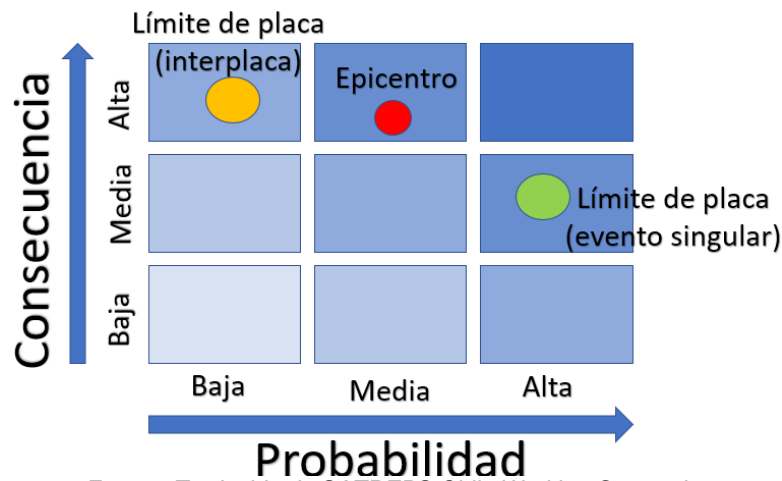
A continuación, se señalan sus componentes principales.

3.5.1. Matriz de riesgo

La matriz de riesgo es una herramienta que permite priorizar las amenazas identificadas en función de los parámetros utilizados para la caracterización del riesgo asociado a su ocurrencia. Estas permiten identificar el escenario disruptivo a utilizar para el análisis de los recursos de la organización.

Se propone parámetros para su confección, desde un punto de vista operacional. Se debe considerar el nivel de exposición y el riesgo (en función de la viabilidad y su impacto) de la amenaza (Rodríguez, 2011). En cambio, SATREPS Chile Working Group 4b (2016) recomienda que las amenazas sean evaluadas por su impacto y probabilidad de ocurrencia, permitiendo identificar los diferentes escenarios en función de estas variables. En la Ilustración 3-3 se muestra esta relación para el caso de un terremoto.

Ilustración 3-3 Matriz de riesgo por terremoto - Ejemplo



Fuente: Traducido de SATREPS Chile Working Group 4b

3.5.2. Estimación de daños

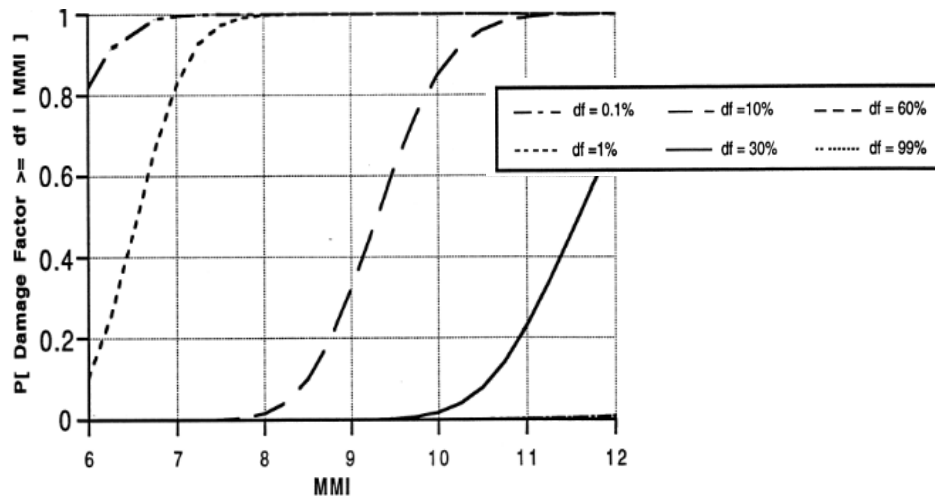
3.5.2.1. Daños por terremoto

El daño puede ser evaluado haciendo uso de curvas de fragilidad. Estas proporcionan una relación gráfica entre la probabilidad de daño que la estructura pueda sufrir y el parámetro físico a considerar. Para su confección se encuentran métodos experimentales (Chong, 2000) y probabilísticos (Ellingwood, 2001) que entregan alta precisión en sus resultados, pero requieren de experimentos en laboratorios o modelación numérica.

Otros modelos requieren menos recursos, en este contexto es que destacan autores como Shinozuka (2000) que propone una construcción utilizando observaciones en terreno de los daños provocados, sobre las estructuras por un sismo. Por su parte Anagnos (1995) utiliza un método para elaborar curvas de fragilidad a través de opinión de expertos, utilizando la escala de MMI⁸ y el factor de daño df para representar el comportamiento de la estructura (Ilustración 3-4).

⁸ Intensidad de Mercalli Modificada

Ilustración 3-4 Curva de Fragilidad a partir de opinión de expertos



Fuente: (Anagnos, 1995)

Clasificación del daño

El ATC-13 “*Earthquake damage evaluation data for California*” (ATC, 1985) propone una clasificación e identificación del daño en función de las reparaciones necesarias para su uso normal (ver Tabla 3-3) posterior a un desastre sísmico.

Tabla 3-3 Resumen de estados de daño

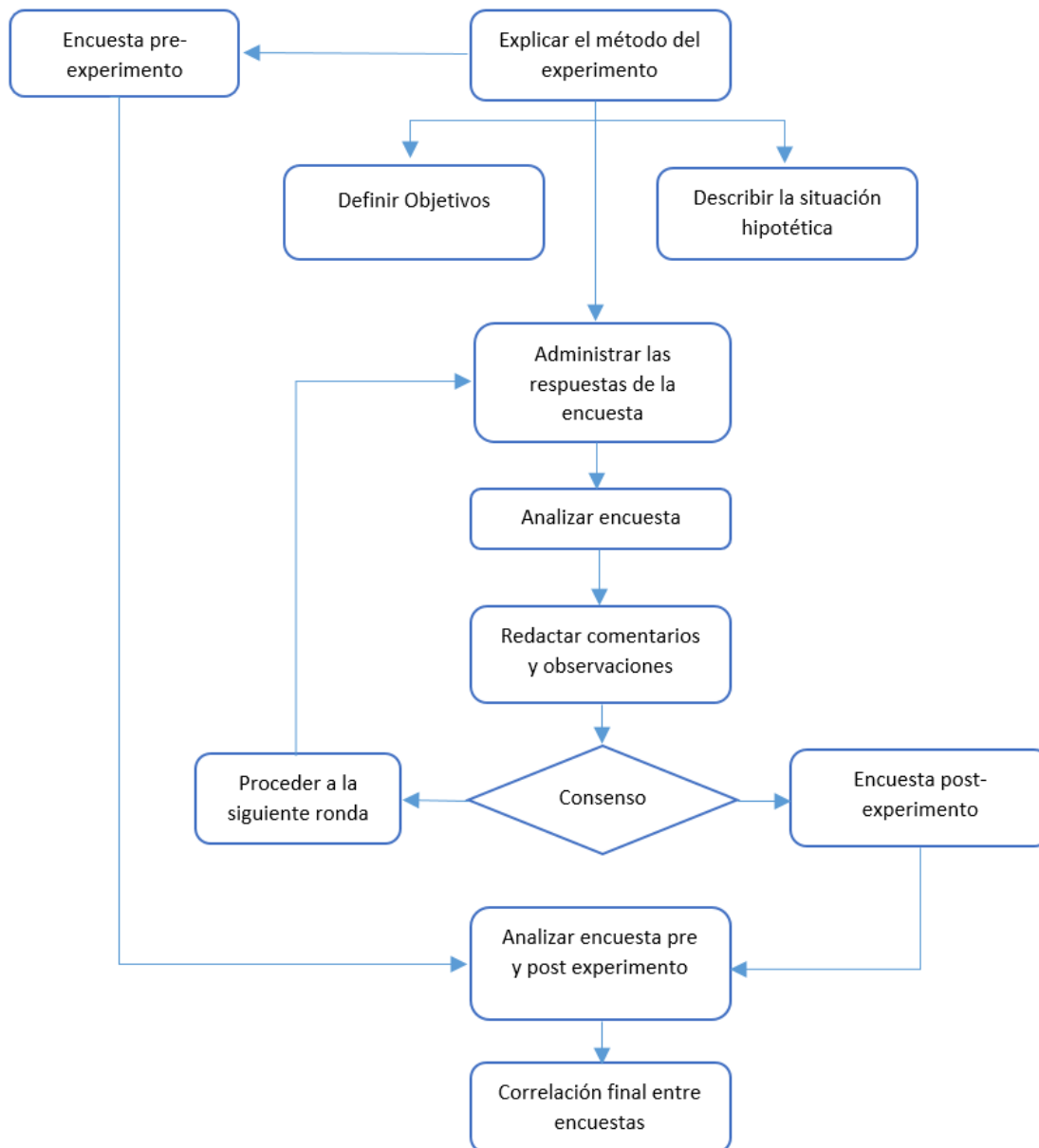
Estado de daño	Descripción	Definición	Rango de factor de daño (%)	Factor de daño central (%)
1	Nulo	No hay daño	0	0
2	Leve	Daños localizados limitado que no requiere de reparación	0-1	0.5
3	Ligero	Daños localizados significativo, en general los componentes no requieren reparación	1-10	5
4	Moderado	Daños localizados significativos en muchos componentes que justifican reparación	10-30	20
5	Grave	Daños extensos que requieren reparaciones mayores	30-60	45
6	Significativo	Daño generalizado que puede resultar en la demolición o reparación completa de la instalación	60-100	80
7	Destrucción	Daño irreparable, colapso o destrucción total	100	100

Fuente: ATC-13

Matriz de probabilidad de daño

Para evaluar el daño directo provocado por movimiento telúrico, se dispuso de todos los antecedentes de daños y sismos recopilados por la ATC, a partir de un proceso de consulta a un equipo de expertos, que siguiendo el algoritmo de la Ilustración 3-5, evaluaron el comportamiento sísmico de cada una de las estructuras mencionadas en el capítulo 3 del “*Earthquake damage evaluation data for California*” con el propósito elaborar una matriz de daño para cada tipo de instalación (ATC, 1985).

Ilustración 3-5 Algoritmo proceso de opinión de expertos



Fuente: Traducido de (ATC, 1985)

De esta forma cada clasificación de instalaciones con diseño sísmico tiene su propia matriz elaborada, en función de la escala MMI. En la Ilustración 3-6 se observa una matriz de

probabilidad de daño para la clasificación 1, donde se observan, para el caso de la intensidad VI en la escala de MMI, un 3.7% de probabilidades de no percibir daño alguno (estado 1 de daño), un 68.5% de probabilidades para percibir daños leves (estado 2 de daño) y un 27.8% de probabilidades para percibir ligeros daños en las estructuras de este tipo.

Ilustración 3-6 Matriz de probabilidad de daño para un bastidor de madera de baja altura

Central Damage Factor	Modified Mercalli Intensity						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
----- FACILITY CLASS= 1 -----							
0.00	3.7	***	***	***	***	***	***
0.50	68.5	26.8	1.6	***	***	***	***
5.00	27.8	73.2	94.9	62.4	11.5	1.8	***
20.00	***	***	3.5	37.6	76.0	75.1	24.8
45.00	***	***	***	***	12.5	23.1	73.5
80.00	***	***	***	***	***	***	1.7
100.00	***	***	***	***	***	***	***

Fuente: ATC-13

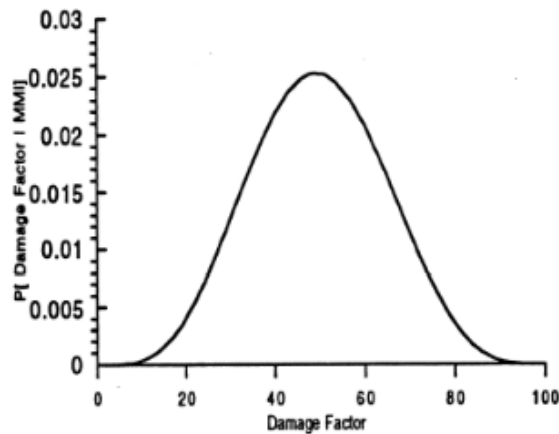
La recopilación estadística de los datos de opinión de expertos encontrados en el ATC-13, Apéndice G, es utilizada para transformar las matrices de probabilidad de daño en relaciones de tipo LogNormal de la fragilidad de las distintas clasificaciones del documento. La estadística consiste en las mejores estimaciones para los valores bajos, medios y altos de factor de daño, para cada instalación en función del nivel de movimiento de tierra (MMI).

En el ATC-13, las distribuciones Beta de probabilidad pueden ser confeccionadas con la información estadística que tiene cada instalación para cada magnitud de MMI. Los valores bajos y altos de factor de daño definen los extremos que contienen el 90% de la probabilidad. La mejor estimación (valor medio) y los extremos del 90% son utilizados para calcular los parámetros de forma de la distribución beta que más se ajusta a la curva. Obteniendo así, parámetros en forma de una distribución beta, para cada magnitud MMI estimando la probabilidad de ocurrencia de cada factor de daño.

La distribución puede ser simétrica o con sesgos a los costados dependiendo de los valores de los parámetros. Esta es una de las características del por qué se utiliza esta distribución para el cálculo de probabilidad de daño. Para niveles bajos de MMI es factible encontrar distribuciones con tendencia al costado izquierdo, donde se encuentran niveles bajos de daño. Para niveles de MMI más elevados la densidad de probabilidades tenderá hacia la izquierda donde se observan las mayores probabilidades de daños mayores. Las matrices de probabilidad de daño encontradas en el ATC-13 son elaboradas integrando las distribuciones beta de acuerdo con los rangos de los factores de daño anteriormente mencionados.

En la Ilustración 3-7 Distribución Beta típica, elaborada para cada instalación y nivel de MMI se presenta a modo de ejemplo una función de distribución Beta elaborada una cierta instalación y escala de MMI. Para cada clasificación se obtienen entonces, 7 distribuciones Beta de probabilidad (MMI: VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII).

Ilustración 3-7 Distribución Beta típica, elaborada para cada instalación y nivel de MMI



Fuente: Anagnos, 1995

La probabilidad de daño relacionada a cada rango se obtiene calculando el área bajo la curva entre cada extremo del rango. Este valor estará asociado a la probabilidad de obtener un daño igual o mayor para una determinada magnitud. De esta forma se obtiene la probabilidad de daño para cada magnitud, para cierto rango de daño, que se resume en las matrices de probabilidad de daño encontradas en la ATC-13.

3.5.2.2. Daño por tsunami

Autores como Shuto (1993) y Papadopoulos (2001) proponen escalas de intensidad y daño en función de la altura de ola del tsunami, teniendo una directa relación entre sí, como se puede observar en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4 - Relación entre la intensidad de propuesta por Papadopoulos y Shuto

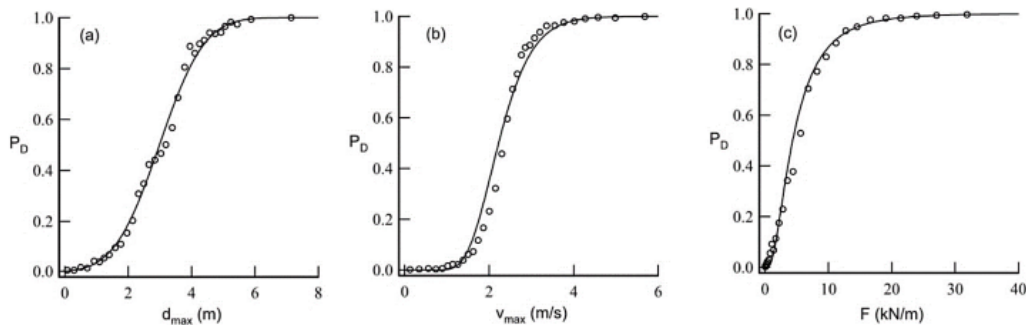
Papadopoulos 2001	Shuto 1993	
Intensidad	Intensidad	H (m)
<i>I – V</i>	0	<0.1
<i>VI</i>	1	2
<i>VII – VIII</i>	2	4
<i>IX – X</i>	3	8
<i>XI</i>	4	16
<i>XII</i>	5	32

Fuente: (Papadopoulos & Imamura, 2001)

En cambio, Papathoma (2003) propone un modelo de evaluación de la vulnerabilidad ante tsunami, utilizando información detallada sobre impactos históricos y evaluaciones de daño en edificaciones post-tsunami.

Koshimura (2009) plantea la utilización de curvas de fragilidad, utilizando la probabilidad de daño estructural o la tasa de fatalidad en conjunto con las características hidrodinámicas del flujo de inundación (profundidad, velocidad y fuerza). Este modelo se diferencia del resto debido al uso de información obtenida por teledetección por satélite, modelación numérica y trabajo de campo. Requiriendo a lo menos dos de las anteriores para su confección.

Ilustración 3-8 Curvas de fragilidad para el tsunami de 2004 en Banda Aceh, Indonesia



Fuente: Koshimura, 2009

En la Ilustración 3-8 se observan las curvas para cada parámetro hidrodinámico del flujo de inundación, usando distribuciones probabilísticas Normal o Lognormal que representan la probabilidad de ocurrencia de daño acumulada.

A su vez el autor propone una tabla de caracterización de daño que permite hacer un análisis diferenciado entre diferentes estados de deterioro (ver Tabla 3-5)

Tabla 3-5 Nivel de daños, clasificación, descripción y condición de las estructuras/recursos

Nivel de daño	Clasificación	Descripción	Condición
1	Daño mínimo	Daños no estructurales, con poca presencia de inundación.	Se puede utilizar luego de un secado y/o limpieza en paredes y piso.
2	Daño moderado	Leves daños en componentes estructurales.	Utilización del recurso luego de leves probables reparaciones.
3	Daño significativo	Leves daños en muros estructurales, pero no en columnas y pilares.	Requiere mayores reparaciones para su utilización.
4	Daño completo	Daño de mayor magnitud en estructuras tipo viga, columna y muro.	Requiere de reparaciones y remodelaciones en zonas estructurales.
5	Colapso	Pérdida de los componentes principales del recurso/estructura.	Reconstrucción completa o parcial de alto costo / Compra de otra alternativa.

Fuente: Modificación a tabla propuesta por Koshimura, et. al. (2009)

Daño sobre elementos tipo contenedor

En el presente estudio se realizó análisis sobre estructuras de tipo contenedor considerando el estudio confeccionado por Kumagai (2013) quien realizó una recopilación de daños provocados por tsunamis en este tipo de recurso considerando la profundidad del tsunami. Las valorizaciones del daño esperado para las distintas formas de apilar los contenedores, se calcula la fuerza boyante de cada condición de la Tabla 3-6.

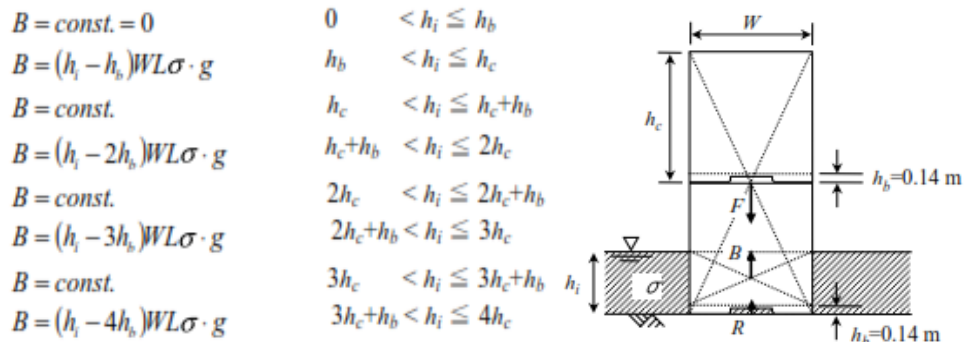
Tabla 3-6 Condiciones de contenedores

Condición	Característica
Contenedor 40' Pila Individual – sin carga	Contenedor de 3.9 [ton] sin carga extra.
Contenedor 40' Pila Individual – con carga	Contenedor de 3.9 [ton] con una carga extra de aproximadamente 15 [ton]
Contenedor 40' Pila Doble – sin carga	Grupo de contenedores de 7.8 [ton] sin carga extra.
Contenedor 40' Pila Doble – con carga	Grupo de contenedores de 7.8 [ton] con una carga extra de aproximadamente 30 [ton]
Oficina contenedor 20' Pila individual Carga ligera	Contenedor de 1.9 [ton] con cargas de 300 [kg] utilizados como oficinas y vestidores

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de las fuerzas verticales de los contenedores en presencia de inundación, se utiliza las formulaciones propuestas por Kumagai. En la Ilustración 3-9 se presenta un diagrama con las fuerzas verticales y el rango de boyantes para cada escenario de inundación en función de los contenedores.

Ilustración 3-9 Formulación de boyantes y Diagrama de fuerzas de equilibrio para contenedor Pila Doble

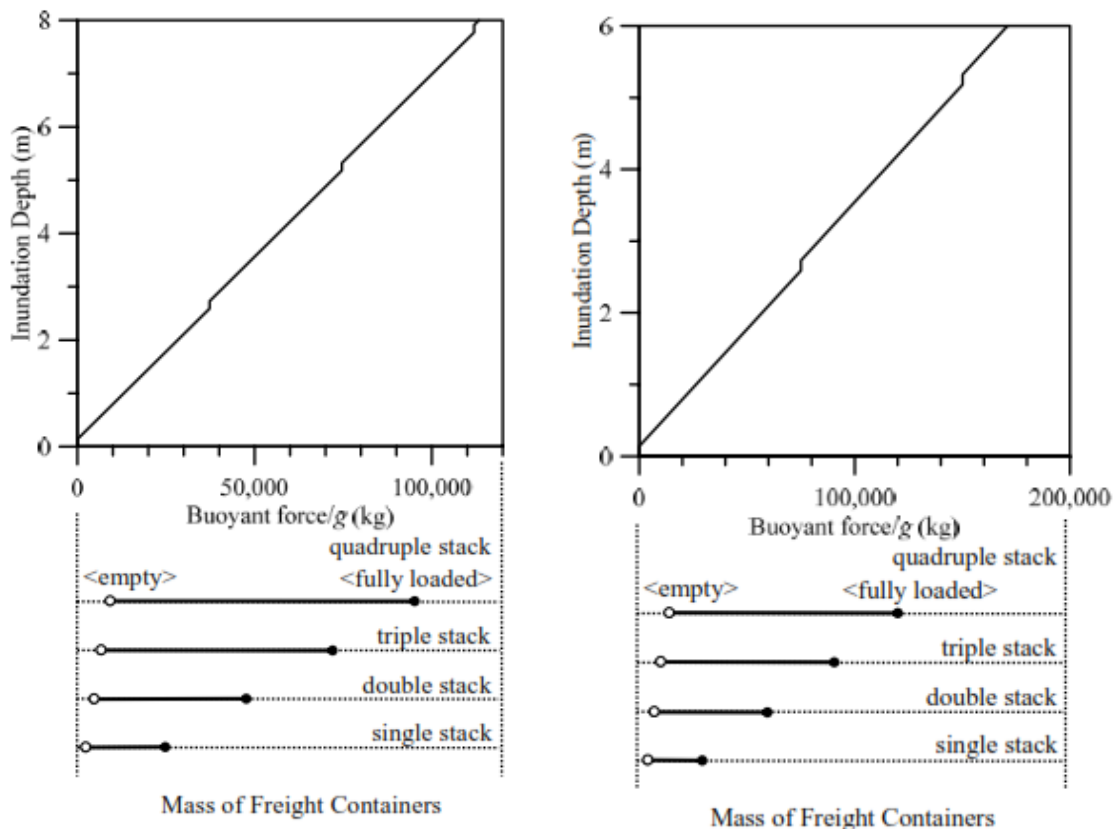


Fuente: Kumagai (2013)

Cuando la resultante R ($R=M-B$) es negativa, los contenedores flotan y son trasladados. Cuando el valor R es 0 ó positivo, la estabilidad de los contenedores depende del balance entre la fuerza de fricción con el suelo y la fuerza de arrastre en la horizontal.

El autor presenta una relación entre la profundidad de inundación y la boyantes (B/g) para los contenedores 20' y 40'. En la Ilustración 3-10 se puede observar la relación entre ambos con la línea de estabilidad, donde los casos ubicados sobre la recta se encuentran flotantes y el resto se debe evaluar con las fuerzas horizontales

Ilustración 3-10 Relación profundidad de inundación y fuerza boyante



Fuente: Kumagai (2013)

3.5.2.3. **Elaboración de curvas de fragilidad**

Anagnos, T., Rojahn, C., & Kiremidjian, A. S. (Anagnos, 1995) y Koshimura, et al. (Koshimura, 2009) propusieron la elaboración de curvas de fragilidad como método para evaluar el daño estructural y operacional ante un escenario sísmico y tsunami correspondientemente. Las curvas de fragilidad son distribuciones de probabilidad que representan la probabilidad de ocurrencia de daño acumulada, dadas por las formulaciones de la Ecuación 3-6.

Ecuación 3-6 Probabilidad acumulada

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{(2\sigma)^2}} dt$$
$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{\ln(x) - \lambda}{\xi} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi t} e^{-\frac{(\ln(t)-\lambda)^2}{(2\xi)^2}} dt$$

Donde:

$P_D(x)$: Representa la probabilidad de daño estructural o la tasa de fatalidad

Φ : Función de distribución normal o LogNormal estandarizada con media igual a 0 y desviación estándar igual a 1

x ($\ln x$): Parámetro del sismo (Aceleración máx., Escala de Richter o Mercalli) o tsunami (Cota de inundación, Velocidad de flujo, Fuerza de arrastre)

μ (o λ) : Media

σ (o ξ) : Desviación Estándar

Para su confección, koshimura propone 5 pasos que pueden ser aplicados en los análisis para ambos escenarios mencionados, considerando el material y los recursos disponibles:

- 1) Recopilación de información de daños:** Obtener información de campo o satélite, informes previos, investigaciones o data histórica del sector que proporcionen una idea del daño que provoca el escenario disruptivo.
- 2) Estimación de las amenazas del tsunami:** Estimar los parámetros característicos del evento a través de modelos numéricos, trabajo de campo o documentos históricos.
- 3) Asimilación entre la información de daño y la información de la amenaza:** Correlacionar la información de daño con los parámetros obtenidos en el punto 2.
- 4) Calcular la probabilidad de daño:** Determinar la probabilidad de daño para cada evaluación de daño en función de los parámetros obtenidos.
- 5) Análisis de regresión:** Desarrollando las curvas de fragilidad mediante análisis de regresión de conjuntos discretos de probabilidad de daño y efectos del escenario.

4. Descripción del terminal 2

Terminal Cerros de Valparaíso es la empresa concesionaria a cargo de la explotación y desarrollo del Terminal 2 del Puerto de Valparaíso, desde diciembre del 2013 hasta el año 2043. El terminal cuenta con los sitios de atraque 6, 7 y 8 (ver Ilustración 4-1), ubicados en el espigón construido entre el 1912 y 1930 y que no ha sufrido mayores transformaciones desde su manufactura. Dicha estructura está conformada por muros perimetrales de bloques de hormigón en masa que contienen un relleno granular que confirma la explanada interior. Su longitud es del orden de los 240 [m], con un ancho que varía entre 115 [m] en tierra, hasta 100 [m] mar a dentro.

Ilustración 4-1 Terminal 2, Puerto de Valparaíso



Fuente: Google Earth modificado

4.1. Descripción general sitios de atraque

Los sitios 6 y 8 están conformados por muros de bloques de hormigón con una cota de coronamiento promedio de 4.4 [m], posee una cota de fondo marino 9.1[m] y están apoyados en una cama de enrocado. Los bloques de hormigón fueron instalados de manera inclinada (ver Ilustración 4-2). Ambos sitios se utilizan para la explotación de carga/descarga de contenedores y carga en general para naves con longitud de 185 [m] de largo y calado de 8.5 [m] para sitio 6, y 235 [m] de largo y un calado de 8,8 [m] para el sitio 8 (PRDW, 2012).

Ilustración 4-2 Bloques inclinados Sitio 8



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

El sitio 7 está formado por un cajón de hormigón armado relleno con rocas y hormigón (ver Ilustración 4-3), sobre el cual existe un bloque de coronamiento con cota superior de 4.2 [m]. Bajo el cajón existen bloques de estabilización y un bloque que evita la socavación. Este sector, debido a su menor longitud, destina su explotación a cabotaje nacional, ya que cuenta con una eslora autorizada de 125 [m] y un calado de 6.2 [m].

Ilustración 4-3 Sitio 7, Cajón más bloque de coronamiento



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

4.2. Descripción de estructuras sobre el espigón

Sobre el espigón se observan diferentes edificaciones y contenedores adecuados como camarines u oficinas de patio que se detallarán a continuación:

4.2.1. Contenedores tipo oficina

En un costado del sitio 6, cerca del vértice colindante con el Muelle Prat, se encuentran oficinas y zona de camarines para los empleados que trabajan en la explanada. Estas estructuras no tienen ningún tipo de fundación ni unión con la losa (ver Ilustración 4-4) y se

observa un caso donde se destinan dos contenedores en vertical para este uso (ver Ilustración 4-5).

Ilustración 4-4 Contenedor utilizado como oficina



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

Ilustración 4-5 Dos contenedores en vertical utilizado como oficina



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

4.2.2. Cafetería y panel eléctrico central

Edificación de dos pisos de hormigón armado. Dentro se encuentra una cafetería y baños para uso de los trabajadores del patio.

En el costado noroeste de la estructura se ubica el panel de distribución eléctrica del espigón, con el que alimenta las baterías de los contenedores de frío, observadas a un costado de la Ilustración 4-6.

Ilustración 4-6 Cafetería



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

Ilustración 4-7 Panel eléctrico



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

4.2.3. Descripción de maquinaria

El transporte de contenedores no es la única actividad desarrollada en el espigón, por esto es posible encontrar vehículos que transporten elementos contenidos en pallets (ver Ilustración 4-8). Estos son llevados al sitio 7 del puerto donde se cargan las naves de cabotaje nacional.

Ilustración 4-8 Vehículo de carga



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

Ilustración 4-9 Sitio 7 en proceso de carga



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

También se observan dos grúas que permiten la carga y descarga de contenedores en los sitios 6 y 8. Las grúas con las que cuenta TCVAL son Gottwald GHMK 6407, con una capacidad máxima de 47 [Ton].

Ilustración 4-10 Grúa Gottwald GHMK



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

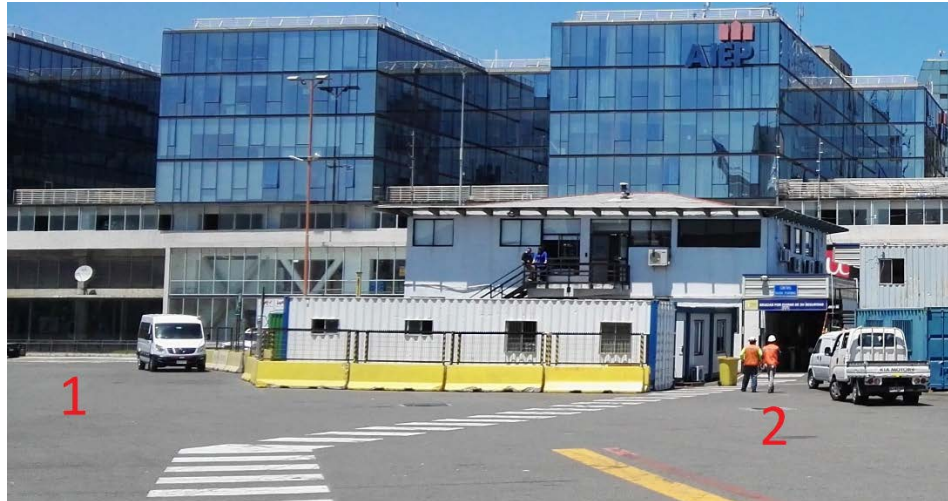
En la Ilustración 4-10 se observa una imagen de la grúa que se caracteriza por tener 4 apoyos de 2[m]x4.5[m] con una capacidad de carga de 47[ton]. Este tipo de maquinaria tiene la facilidad de trasladar sus funciones de un sitio de atraque a otro, pudiendo trabajar ambas en simultáneo en un mismo sitio.

4.2.4. Zonas de trabajo

Se puede hacer ingreso de dos formas al espigón:

- 1) Por medio de vehículos particulares o camión para transporte de carga.
- 2) Ingreso zona de seguridad para peatones.

Ilustración 4-11 Zona de ingreso



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

En el sector de ingreso de seguridad se encuentran las oficinas del personal a cargo de la operatividad del espigón. En él, se puede encontrar personas a cargo de la maquinaria y electricidad como también de la seguridad y control de riesgo del puerto.

Ilustración 4-12 Sector de oficinas



Fuente: Captura propia autorizada por TCVAL

5. Metodología

A continuación, se presenta la metodología a utilizar para la elaboración de estrategias de continuidad mediante un análisis de riesgo, considerando los alcances y limitaciones mencionados en los puntos 2.3 y 2.4.

5.1. Estimación de daños

Como se ha mencionado anteriormente (ver capítulo 1 y 2) se estudiaron dos escenarios por separado, independientes entre sí, con el fin de acotar las variables de entrada del estudio. Seguido a esto, se detalla el procedimiento para la estimación de daños para cada situación disruptiva permitiendo valorizar el daño y su probabilidad.

5.1.1. Riesgo por terremoto

Para la elaboración de curvas, se propone una metodología que contempla el uso de matrices de probabilidad de daño en función del movimiento del suelo (Escala MMI), elaboradas por la "Applied Technology Council" en 1985 (Anagnos, 1995).

El ATC-13 "*Earthquake damage evaluation data for California*" (ATC, 1985) es un documento que recopila antecedentes de daños por terremoto en distintas partes del mundo y pone a evaluación de expertos, una serie de estructuras que son diferenciadas por su uso, tamaño, materialidad e importancia.

La metodología permite la elaboración de múltiples curvas para cada tipo de estructura, permitiendo calcular la probabilidad de daño para cada uno de los estados de daño en función de la escala MMI. Estos resultados se comparan y validan con las experiencias recopiladas en los puertos de Chile.

5.1.1.1. Selección de recursos y recopilación de antecedentes

De todos los recursos identificados en el punto 4, se seleccionan las instalaciones, estructuras o elementos que presenten complicaciones en la operación del puerto ante un escenario sísmico. Junto a ello se realiza una recopilación de antecedentes que colabora con la selección de estos y la validación de resultados.

5.1.1.2. Clasificación de las estructuras

El documento elaborado por la ATC, para evaluar el compartimiento de diferentes estructuras de California a través de la evaluación de expertos, establece dos tipos de clasificación con la finalidad de evaluar las pérdidas por escenarios sísmicos, incluyendo los efectos socioeconómicos. Estos son:

- Clasificación de la función social de la instalación
- Clasificación de instalaciones con diseño sísmico

La clasificación de la función social de la instalación tiene 35 clases de instalaciones. Estas son seleccionadas como lo estipula la base de datos de la FEMA (ATC, 1985) y teniendo en consideración las clasificaciones del departamento de comercio de los Estados Unidos.

La clasificación de instalaciones con diseño sísmico contiene 78 tipos de estructuras, 40 de ellas son edificaciones y las otras 38 son para otro tipo de estructuras (túneles, grúas, puentes, etc.). Estas 78 clases son seleccionadas en base a la recopilación de antecedentes realizadas en la investigación del ATC-13, clasificando en la lista, la totalidad de tipos de estructuras con diseño sísmico encontradas en California.

Para la aplicación, propuesta por Anagnos, se debe asociar cada estructura del estudio a cada clasificación en función del requerimiento sísmico, materialidad, cargas externas y uso.

5.1.1.3. Caracterización del sismo

El ATC-13 realiza una recopilación de antecedentes de daño por diferentes sismos, los cuales son presentados a un grupo de expertos para su evaluación y comportamiento para cada clasificación mencionada en el capítulo 5.1.1.2 (Método Delphi).

Debido a que cada sismo tiene características propias y complejas de predecir o medir (dirección, aceleración máxima, distancia de la falla, tipo de falla, tipo de suelo, etc.) se propone evaluar el daño a las instalaciones (costo de reparación/costo de reconstrucción) utilizando como magnitud la Escala Modificada de Mercalli. Dicha escala considera 12 niveles, guardando directa relación con el movimiento y el daño que este movimiento puede provocar. Esto hace que cada registro sísmico recopilado pueda tener una relación con esta escala, obteniendo un valor en común entre cada escenario estudiado.

En el caso de evaluación de daño por sismo, es recomendable considerar las intensidades correspondientes de a los niveles VI al XII. Es en este rango que se puede observar daños a recursos y estructuras según estipula la evaluación de expertos del ATC-13.

5.1.1.4. Curva de Fragilidad

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de experimentar un daño mayor o igual a un estado de daño en función del movimiento telúrico. Por ejemplo, para tener un estado de daño "Grave" o peor, el nivel de daño debe ser igual o mayor a 30%. Es así como para cada clasificación de instalación y MMI, se elaboran curvas de fragilidad integrando la función de distribución Beta acumulada para cada rango de daño asociado a cada nivel. Utilizando la técnica del Error Cuadrático Medio, las curvas de tipo LogNormal pueden ser desarrolladas con los puntos obtenidos que están asociados a cada nivel de daño.

Para cada set de puntos obtenidos se debe calcular una curva de distribución LogNormal que mejor se ajuste, encontrando los valores de la media y desviación estándar asociada al $\ln(MMI)$. La Ecuación 5-1 describe la función de distribución LogNormal para la elaboración de curvas de fragilidad. Esta tiene características similares a la Ecuación 3-6, pues las abscisas representan la MMI y las ordenadas representan el $\ln(MMI)$.

Ecuación 5-1 Relación distribución LogNormal para elaborar curvas de fragilidad en función de la escala MMI

$$P[\text{damage factor} \geq df | MMI] = \int_0^{MMI} \frac{1}{MMI * \sigma_x * \sqrt{2\pi}} * e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(MMI) - m_x}{\sigma_x} \right)^2\right]} dMMI$$

Siguiendo la presente metodología es posible calcular los parámetros de la distribución asociado a cada nivel de daño para cada instalación requerida encontrando los valores que más ajustan a la distribución acumulada de probabilidad.

5.1.2. Riesgo por Tsunami

Para el cálculo de Riesgo por Tsunami se plantea una metodología similar a la utilizada en la valorización de Riesgo por Terremoto. Para ello se proponen ligeras modificaciones a la metodología utilizada en el capítulo 5.1.1 en función de las diferencias de los parámetros característicos del escenario, el daño que estos provocan y los antecedentes existentes como se indican a continuación.

5.1.2.1. Selección de recursos y recopilación de antecedentes

De todos los recursos identificados en el punto 4, se seleccionan las instalaciones, estructuras o elementos que presenten complicaciones en la operación del puerto ante un escenario sísmico. Junto a ello se realiza una recopilación de antecedentes que colabora con la selección de estos y la validación de resultados.

5.1.2.2. Elaboración de matrices de daño y caracterización del tsunami

Debido a la falta de modelación y data histórica de daños en el espigón y las estructuras sobre él, se cruzaron los antecedentes de daños recopilados con los parámetros hidráulicos de la modelación proporcionada por TCVAL.

Se utilizó una metodología diferente para cada recurso, debido a las características propias de cada uno de ellos y sus formas de falla. El escenario modelado fue el de 1730, el cual presenta una altura de ola de 4.2 [m] a 6 [m] (Prof. 0.2[m] a 2 [m] sobre el espigón), siendo este parámetro e intervalo el que se utilizará para la confección de las matrices de daño.

Cada instalación, recurso o estructura será evaluado según las tablas de daño estipuladas en el capítulo 3.5.2.2

5.1.2.3. Confección de Curvas

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de experimentar un daño mayor o igual a un estado de daño en función del parámetro, en este caso, hidráulico. Es así como para cada recurso o instalación, se elaboran curvas de fragilidad considerando las matrices de daño acumulada generadas en base recopilación de antecedentes. Utilizando la técnica del Error Cuadrático Medio, las curvas de tipo LogNormal pueden ser desarrolladas con los puntos obtenidos que están asociados a cada nivel de daño.

Para cada set de puntos obtenidos se debe calcular una curva de distribución LogNormal que mejor se ajuste encontrando los valores de la media y desviación estándar asociada al $\ln(d)$. La Ecuación 5-2 describe la función de distribución LogNormal para la elaboración de curvas de fragilidad. Esta tiene características similares a la Ecuación 5-2, pues las abscisas representan la profundidad (d) y las ordenadas representan el $\ln(d)$.

Ecuación 5-2 Relación distribución LogNormal para elaborar curvas de fragilidad en función de la escala MMI

$$[damage\ factor \geq df | d] = \int_0^{MMI} \frac{1}{d * \sigma_x * \sqrt{2\pi}} * e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(d) - m_x}{\sigma_x}\right)^2\right]} dd$$

Siguiendo la presente metodología es posible calcular los parámetros de la distribución asociado a cada nivel de daño para cada instalación requerida encontrando los valores que más ajustan a la distribución acumulada de probabilidad.

6. Selección Amenaza

6.1. Sismo

El terremoto de Valparaíso en 1730 es uno de los más importantes de la región (Comte, 1986), registrando una magnitud aparente del orden de los 8,7 grados en la escala Richter y magnitud IX en la escala MMI. Carvajal, Cisternas & Catalán (Carvajal, 2017) actualizaron la magnitud estimada para el sismo que generó un tsunami local en la bahía de Valparaíso teniendo repercusiones, incluso en las costas de Japón.

Con los antecedentes históricos de la región y la información de la onda de tsunami que arribó en las costas japonesas, se determinó una mejor aproximación del tamaño de la falla y la magnitud relacionada, mediante uso de modelos numéricos que simularon las ondas de tsunami generadas por el escenario sísmico, se demostró que las estimaciones, históricamente utilizadas, tienden a subestimar el evento de 1730. Las simulaciones realizadas entregan que el terremoto de 1730 tuvo una magnitud del orden de los 9,1 y 9,3 grados en la escala Richter, valor superior a lo estimado años anteriores (Cartas de Inundación SHOA).

Debido a que la relación entre el daño y el sismo en las curvas de fragilidad está determinada por la magnitud del mismo en la escala de MMI, es que se propone considerar una magnitud entre X y XI para el escenario de 1730, considerando lo destructivo que fue para la región y sus habitantes, en función de la actualización realizada por los académicos anteriormente mencionados.

6.2. Tsunami

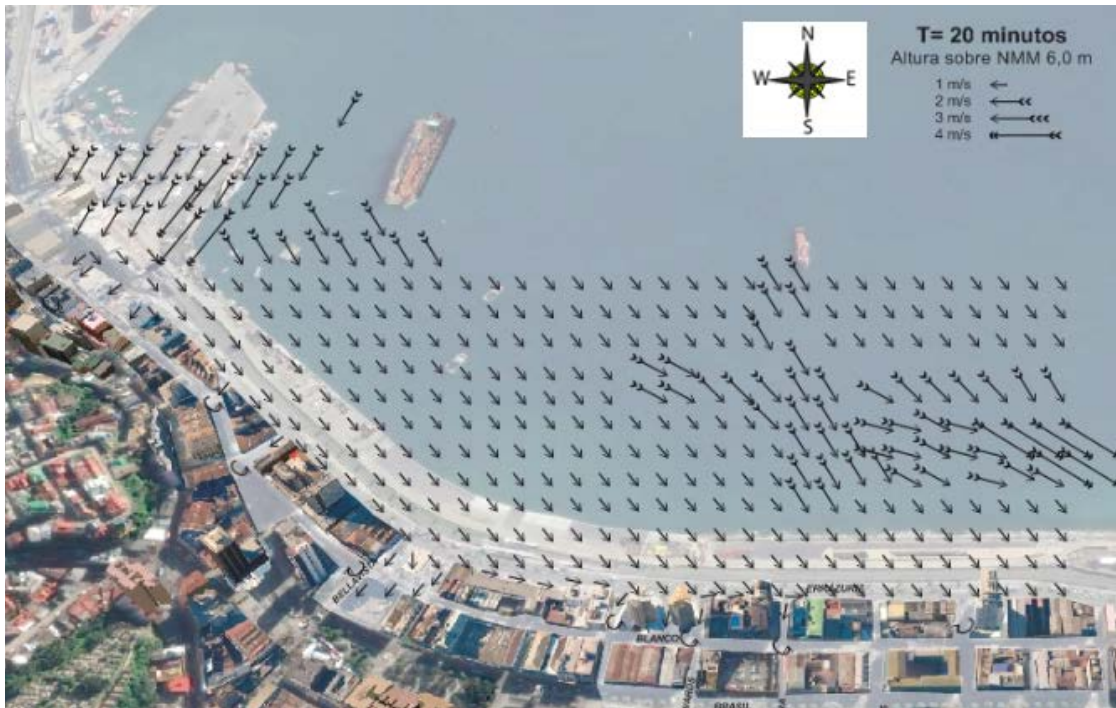
El actual concesionario del terminal 2 del Puerto de Valparaíso, proporcionó un estudio de modelación de tsunami (TCVAL, 2016) que cuenta con parámetros hidráulicos de la simulación del escenario sísmológico de 1730 con 8.7° en la escala de Richter.

El trabajo contempla una simulación con 8 trenes de onda con periodos de aproximadamente 30 minutos. De estos trenes de onda, al menos 3 de ellos son potenciales generadores de inundación directa sobre el sector del espigón y parte de la bahía de Valparaíso del terminal 2.

El modelo no incluye la pérdida de energía y de momento por rotura en la costa concentrando todo el estudio en las ondas que no se rompen.

De la simulación se obtuvo un frente de ondas de lenta propagación hacia las zonas abrigadas de la costa, con un ascenso gradual del nivel del mar frente a la línea de costa inundando la zona portuaria y urbana y teniendo su primer arribo en espigón a los 20 minutos después del suceso sísmico.

Ilustración 6-1 Campo de Velocidades en Tierra - Prof. de inundación = 2 [m]



Fuente: Gentileza de TCVAL

En la ilustración 4-1 se puede observar un campo de velocidades producto del arribo de la primera onda con 6 metros de profundidad sobre el nivel medio del mar. Esta onda llega al espigón con una altura efectiva de 2 metros debido a que la cota de coronamiento de este y de la costa en general es del orden de los 4 metros.

Las siguientes ondas son de menor magnitud alcanzando alturas de 1.5 a 0.2 [m] sobre el nivel de coronamiento. En función de lo anterior, para el análisis de riesgo por tsunami se utilizará como referencia profundidades de 6 [mNRS] y 5,5[mNRS], correspondientes a la primera y segunda onda de arribo del escenario de 1730.

7. Análisis de Riesgo - Sismo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el análisis de riesgo por sismo:

7.1. Recopilación de Antecedentes

Se recaudó información necesaria para la evaluación, validación y comparación de los resultados obtenidos, siendo las de mayor importancia las siguientes:

7.1.1. Informe de estabilidad grúas (propiedad de TCVAL)

Informe proporcionado por TCVAL, en el que se evalúa la estabilidad del espigón del terminal 2 haciendo usos de dos grúas Gottwald en simultáneo, entregando las limitaciones de operación de ambas grúas, además de proporcionar características técnicas de la maquinaria (PRDW, 2014)

Su utilidad fue de carácter informativo, debido a que la estabilidad y la operatividad de las estructuras en condiciones normales no se encuentran dentro de los alcances.

7.1.2. Informe de Puerto de Iquique (DOP⁹)

Este documento corresponde a una recopilación de antecedentes de proyectos de infraestructuras en el puerto de Iquique. En el documento se presentan estudios y criterios de diseños para los diferentes proyectos de la zona, considerando las probabilidades de fallas y escenarios sísmicos e hidrodinámicos.

7.1.3. Resumen de informes Privados, Puertos de la Octava Región (DOP)

Recopilación de antecedentes de los puertos y muelles de la Octava región. En el documento cuenta con descripciones de las estructuras portuarias y las fallas debido al escenario del 27-F. Sin embargo, por falta de estudios técnicos para la elaboración del presente documento, es que no se logró cuantificar el daño diferenciado por los eventos de sismos o tsunamis por separados.

7.1.4. ATC-13 “Earthquake damage evaluation data for California”

Documento elaborado por la ATC (Applied Technology Council) con apoyo de FEMA (Federal Emergency Management Agency) de Estados Unidos. En dicho documento se encuentra una recopilación de antecedentes de daños de diferentes estructuras por sismos, en las principales ciudades de América y Asia, además de contar con una clasificación de las estructuras en función de su materialidad, uso e importancia, las cuales son puesta a evaluación de expertos con el fin de elaborar matrices de probabilidad de daño para cada clasificación.

7.1.5. NCEER-ATC joint Study on Fragility of Buildings, Anagnos, et. Al. (1995)

Documento que propone la utilización de las matrices elaboradas en el ATC-13, para la creación de curvas de fragilidad con el fin de ser aplicadas en diferentes estructuras, validando y comparando los resultados obtenidos.

⁹ Dirección de Obras Portuarias

7.2. Clasificación ATC de estructuras más importantes del espigón

Como se explicó en el capítulo 5.1.1.2, a cada estructura crítica del espigón se le asociará una clasificación de la ATC según se estime correspondiente, con el fin de relacionar las matrices de probabilidad de daño a cada recurso.

De la lista de los elementos, estructuras y recursos mencionadas en el capítulo 4 se seleccionan las estructuras de las que se tienen registros de daños por sismo en la recopilación de antecedentes. El resultado de esta relación se presenta en la Tabla 7-1

Tabla 7-1 Clasificación ATC para estructuras del Espigón

Instalación	Clasificación ATC	Definición	Descripción
Sitios de Atraque	63	Estructuras de frente marino	Estructura masiva de frente marino
Grúa Gottwald	53	Grúas	Elemento/estructura móvil de acero con capacidad de levantar grandes toneladas
Edificio Centro Espigón	4	Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura	Estructura de hormigón armado con uniones empotradas en sus marcos.
Oficina de Control y Seguridad	4	Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura	Estructura de hormigón armado con uniones empotradas en sus marcos.
Equipo de oficina	65	Equipo de oficina	Instalación de oficina
Equipo eléctrico	66	Equipo eléctrico	Instalación eléctrica

Debido a que las estructuras seleccionadas en el capítulo 4.2 contienen recursos dentro y fuera de ellas que son de igual importancia para el negocio como la estructura misma, se propone considerar el equipamiento de oficina y eléctrico en el análisis con el fin de considerar la mayor cantidad de recursos posibles en el estudio.

7.3. Matriz de probabilidad de daño

En la Tabla 7-2 se presentan las matrices de probabilidad de daño para cada una de las clasificaciones anteriormente mencionadas. Los valores están en porcentajes, la suma de cada intensidad es del 100% y los valores “***” corresponden a probabilidades pequeñas que tienden al cero.

Tabla 7-2 Matriz de probabilidad de daño basado en opinión de expertos para instalaciones con diseño sísmico

Factor Central de Daño	Clasificación ATC = 53 Escala Intensidad de Mercalli Modificada						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	39,8	1,7	***	***	***	***	***
0,5	47	43,4	0,5	***	***	***	***
5	13,2	54,9	93,5	42,5	1,6	***	***
20	***	***	6	58,2	71	8,3	0,3
45	***	***	***	0,3	27,4	91	76,6
80	***	***	***	***	***	0,7	23,1
100	***	***	***	***	***	***	***

Factor Central de Daño	Clasificación ATC = 4 Escala Intensidad de Mercalli Modificada						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	20,4	***	***	***	***	***	***
0,5	70,3	15,5	***	***	***	***	***
5	9,3	84,5	88,4	28,9	1,4	***	***
20	***	***	11,6	71,1	81,6	38,7	3,8
45	***	***	***	***	17	61,3	88,7
80	***	***	***	***	***	***	7,5
100	***	***	***	***	***	***	***

Factor Central de Daño	Clasificación ATC = 63 Escala Intensidad de Mercalli Modificada						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	38,0	4,6	***	***	***	***	***
0,5	61,2	37,8	***	***	***	***	***
5	0,8	57,4	83,6	31,4	1,0	***	***
20	***	0,2	16,4	68,5	73,9	8,0	***
45	***	***	***	0,1	25,1	83,5	13,0
80	***	***	***	***	***	8,5	86,8
100	***	***	***	***	***	***	0,2

Factor Central de Daño	Clasificación ATC = 65 Escala Intensidad de Mercalli Modificada						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	39,8	1,7	***	***	***	***	***
0,5	47	43,4	0,5	***	***	***	***
5	13,2	54,9	93,5	42,5	1,6	***	***
20	***	***	6	58,2	71	8,3	0,3
45	***	***	***	0,3	27,4	91	76,6
80	***	***	***	***	***	0,7	23,1
100	***	***	***	***	***	***	***

Factor Central de Daño	Clasificación ATC = 66 Escala Intensidad de Mercalli Modificada						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	39,8	1,7	***	***	***	***	***
0,5	47	43,4	0,5	***	***	***	***
5	13,2	54,9	93,5	42,5	1,6	***	***
20	***	***	6	58,2	71	8,3	0,3
45	***	***	***	0,3	27,4	91	76,6
80	***	***	***	***	***	0,7	23,1
100	***	***	***	***	***	***	***

Fuente: ATC-13

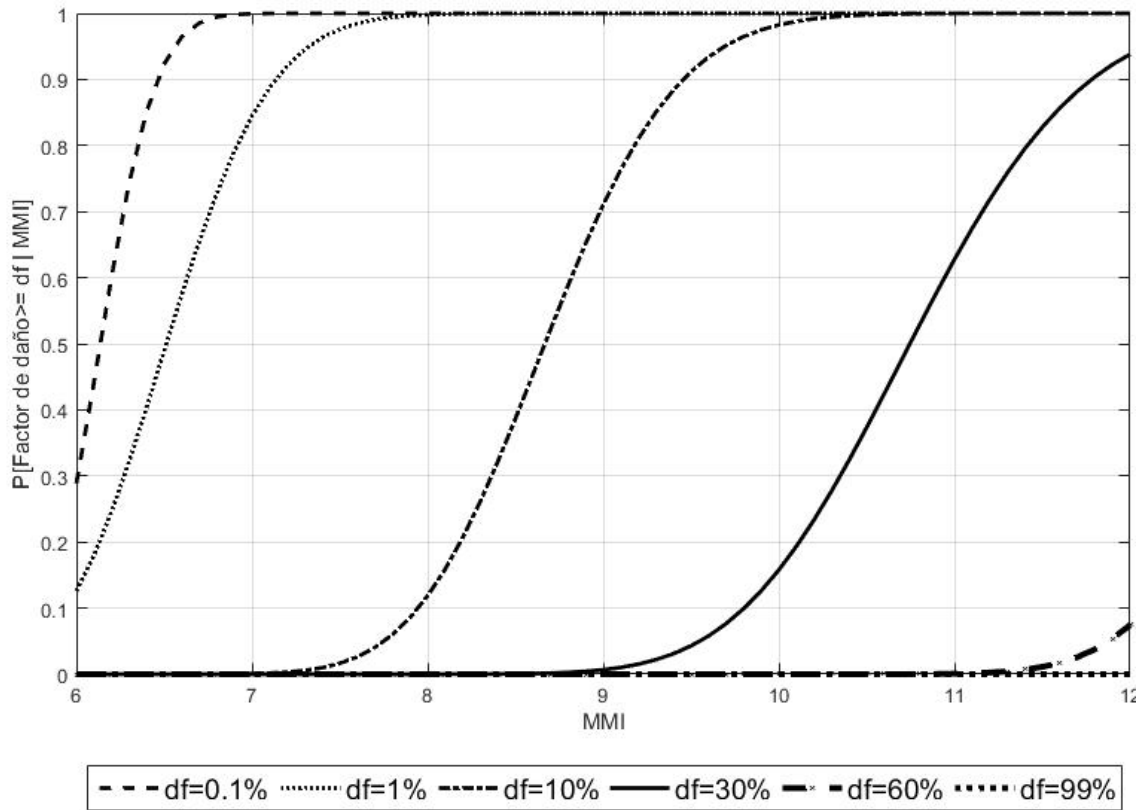
Los datos estadísticos del anexo G del ATC y sus parámetros de distribución Beta asociada a cada intensidad, necesarios para la elaboración de estas matrices de probabilidad de daño, se pueden encontrar en Anexo A y Anexo B

7.4. Curvas de fragilidad

Desde la Ilustración 7-1 a la Ilustración 7-5 se presentan las curvas elaboradas según la metodología propuesta en el capítulo 5.1.1.4 del presente documento. Las matrices Probabilidad Acumulada de Daño, necesarias para la confección de estos resultados se pueden encontrar en el Anexo C.

Cada curva representa la probabilidad acumulada de daño para cada factor de daño (df) definido en el capítulo 3.5.2.1

Ilustración 7-1 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 4 - Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-3 Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 4

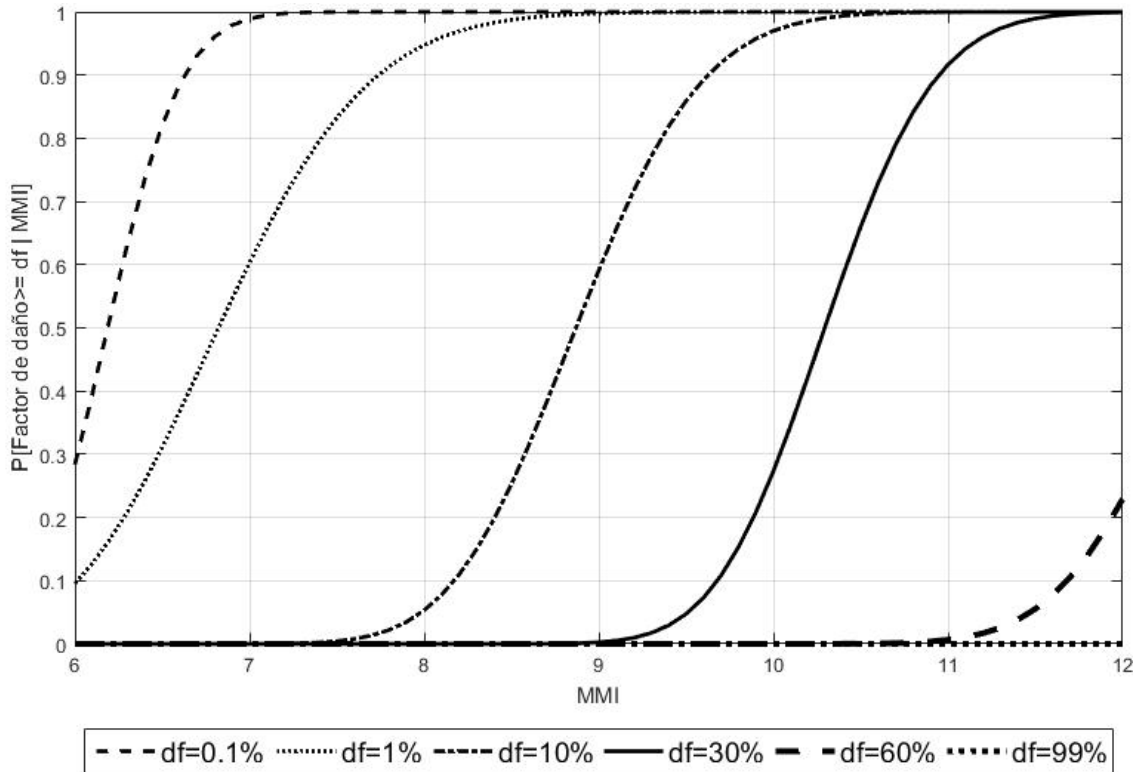
Muro de Hormigón armado con marco momento-resistente

b. Media Altura

Facility Class 4

Factor de daño [%]	0.1	1	10	30	60	99
Promedio de Ln(MMI)	1,81	1,87	2,16	2,37	2,56	98,71
Desviación Estandar de Ln(MMI)	0,04	0,07	0,07	0,07	0,05	12,60

Ilustración 7-2 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 53 - Grúas



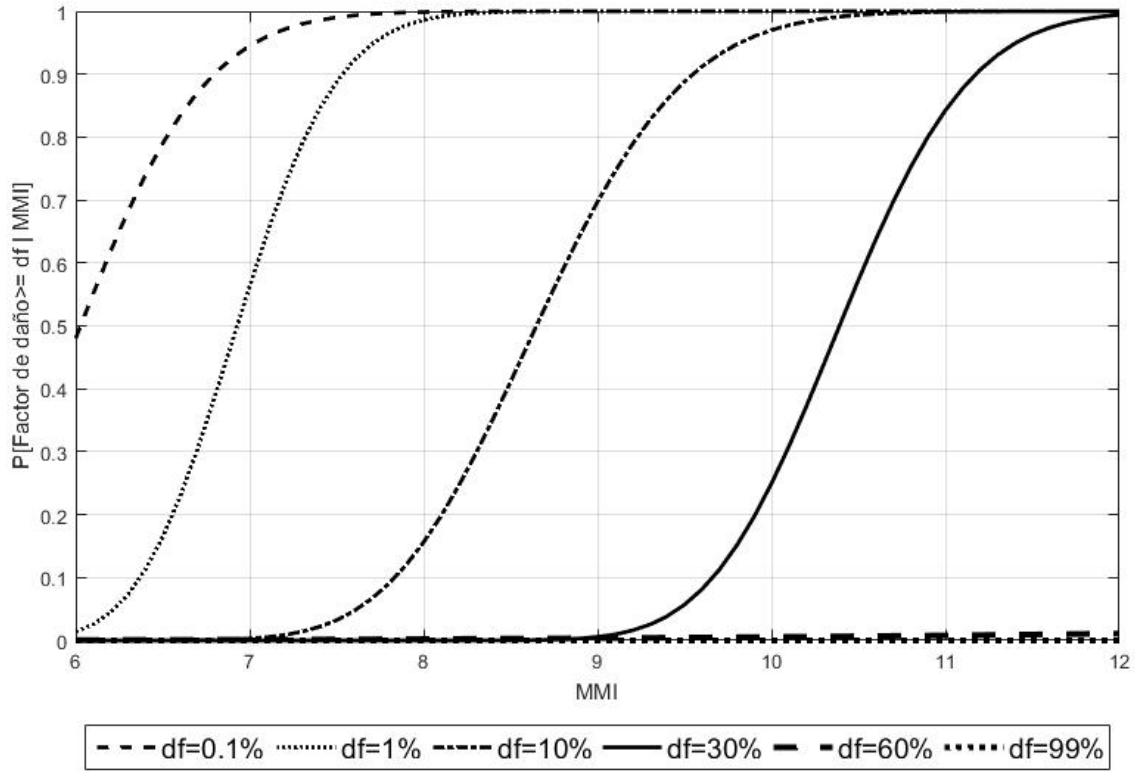
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-4 Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 53

Grúas
 Facility Class 53

Factor de daño [%]	0.1	1	10	30	60	99
Promedio de Ln(MMI)	1,82	1,92	2,18	2,33	2,52	100
Desviación Estandar de Ln(MMI)	0,05	0,10	0,06	0,05	0,05	1E-07

Ilustración 7-3 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 63 – Estructuras de Frente Marino



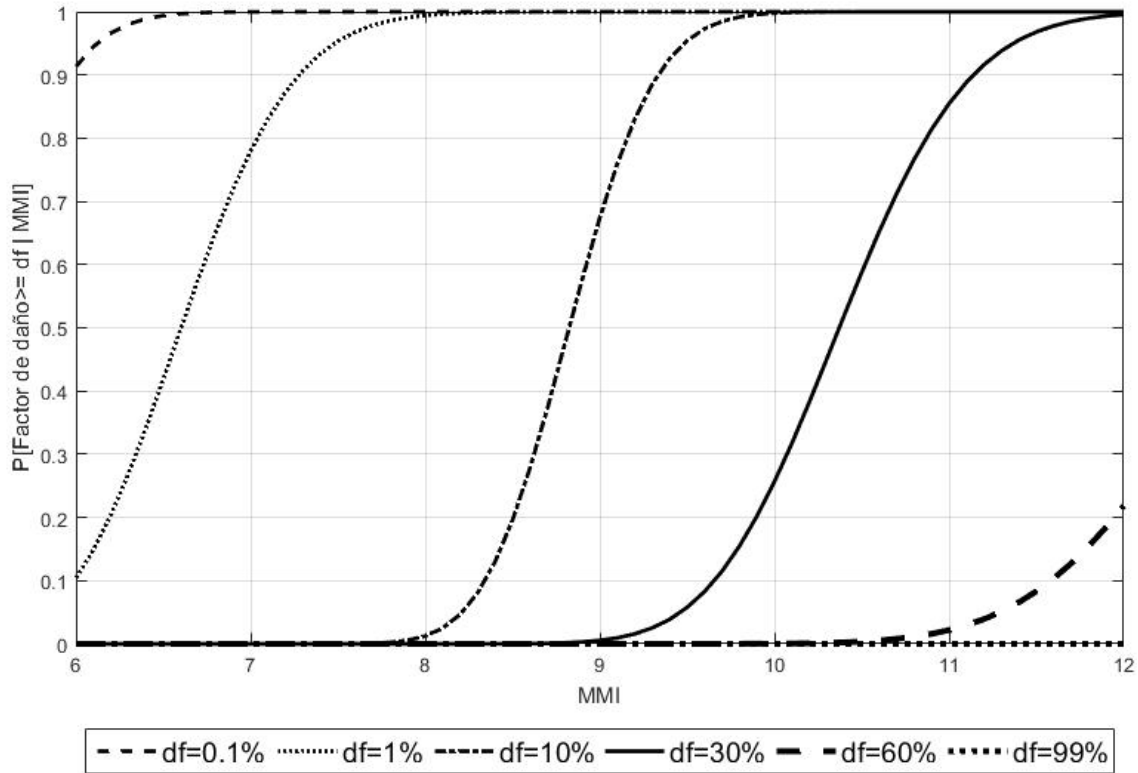
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-5 Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 63

Estructuras de Frente Marino
 Otras Estructuras
 Facility Class 63

Factor de daño [%]	0.1	1	10	30	60	99
Promedio de Ln(MMI)	1,80	1,94	2,16	2,34	4,15	94,78
Desviación Estandar de Ln(MMI)	0,09	0,07	0,08	0,06	0,73	13,71

Ilustración 7-4 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 65 – Equipo de Oficina



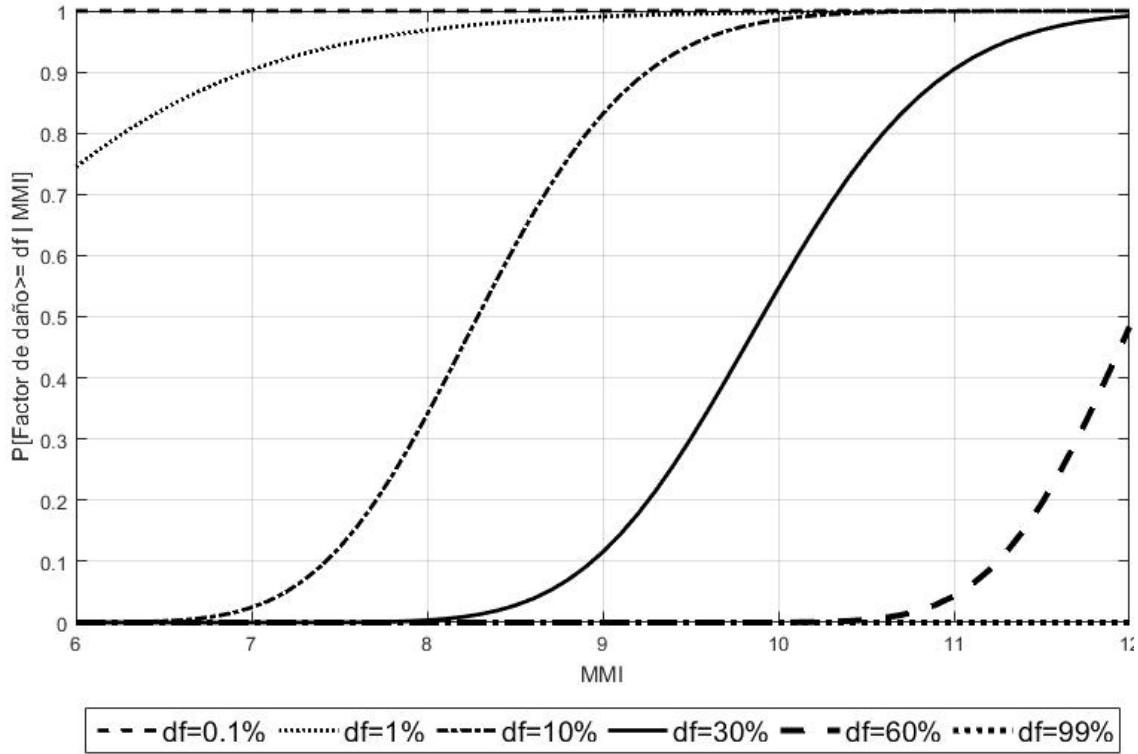
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-6 Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 65

Equipo de Oficina
 Facility Class 65

Factor de daño [%]	0.1	1	10	30	60	99
Promedio de Ln(MMI)	1,70	1,89	2,18	2,34	2,54	68,95
Desviación Estandar de Ln(MMI)	0,07	0,08	0,04	0,06	0,07	8,71

Ilustración 7-5 Curva de Fragilidad – Clasificación ATC = 66 – Equipo Eléctrico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-7 Parámetros de distribución LogNormal para clasificación ATC = 66

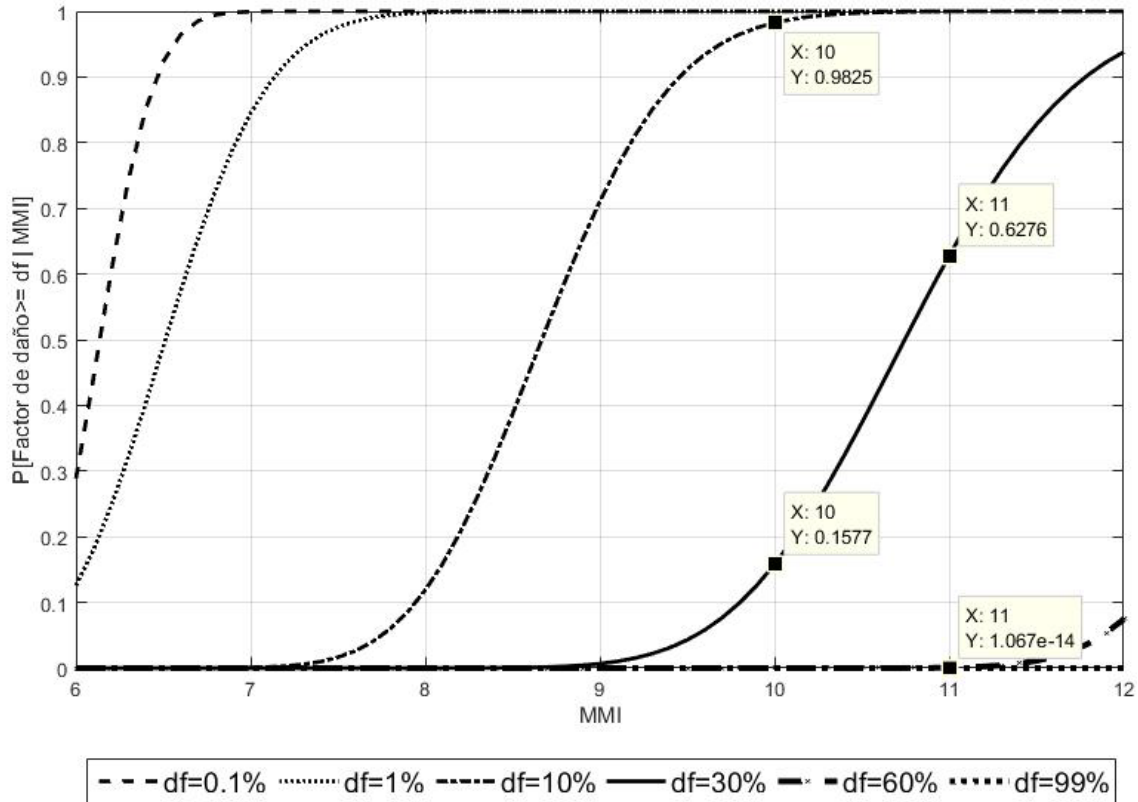
Equipo Eléctrico
 Facility Class 66

Factor de daño [%]	0.1	1	10	30	60	99
Promedio de Ln(MMI)	0,22	1,63	2,11	2,29	2,49	51,55
Desviación Estandar de Ln(MMI)	0,20	0,24	0,09	0,08	0,05	0,77

7.5. Análisis de resultados

7.5.1. Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura (Clasificación ATC = 4).

Ilustración 7-6 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 4 - Muro de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura – Escenario 1730



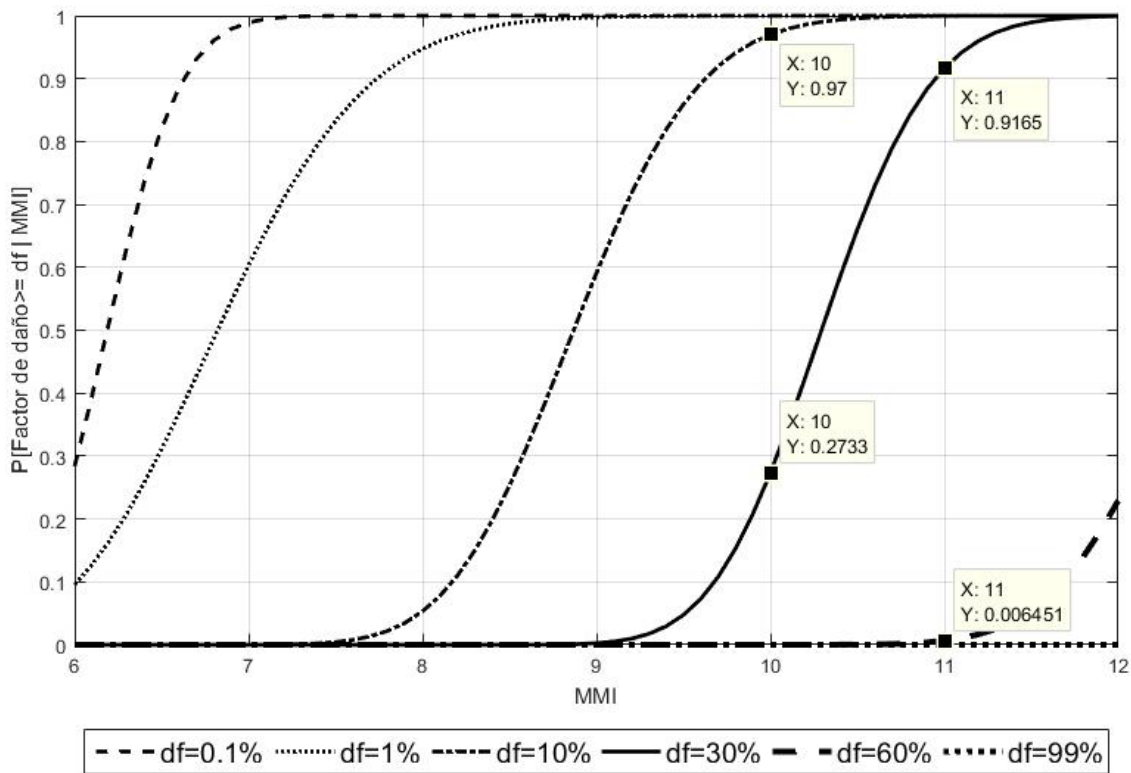
Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios propuestos, las estructuras con muros de hormigón armado con marco momento-resistente de mediana altura, tienen una probabilidad del 98% que presenten un daño del 10% (Daño Ligero) y un 16% de que ocurra un daño del 30% (Daño Moderado) ante un escenario de sismo X en la escala de MMI. No obstante, ante un escenario adverso de nivel XI en la escala de MMI, la probabilidad de recibir un daño del 30% o superior, aumenta al 63%.

Las instalaciones que entran dentro de esta categoría son las dos estructuras de dos pisos que se encuentran en el espigón. Ambas pueden presentar daños que pueden llegar a superar en un 60% los costos de reparación sobre los de reconstrucción en el escenario más adverso.

7.5.2. Grúas (Clasificación ATC = 53)

Ilustración 7-7 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 53 - Grúas



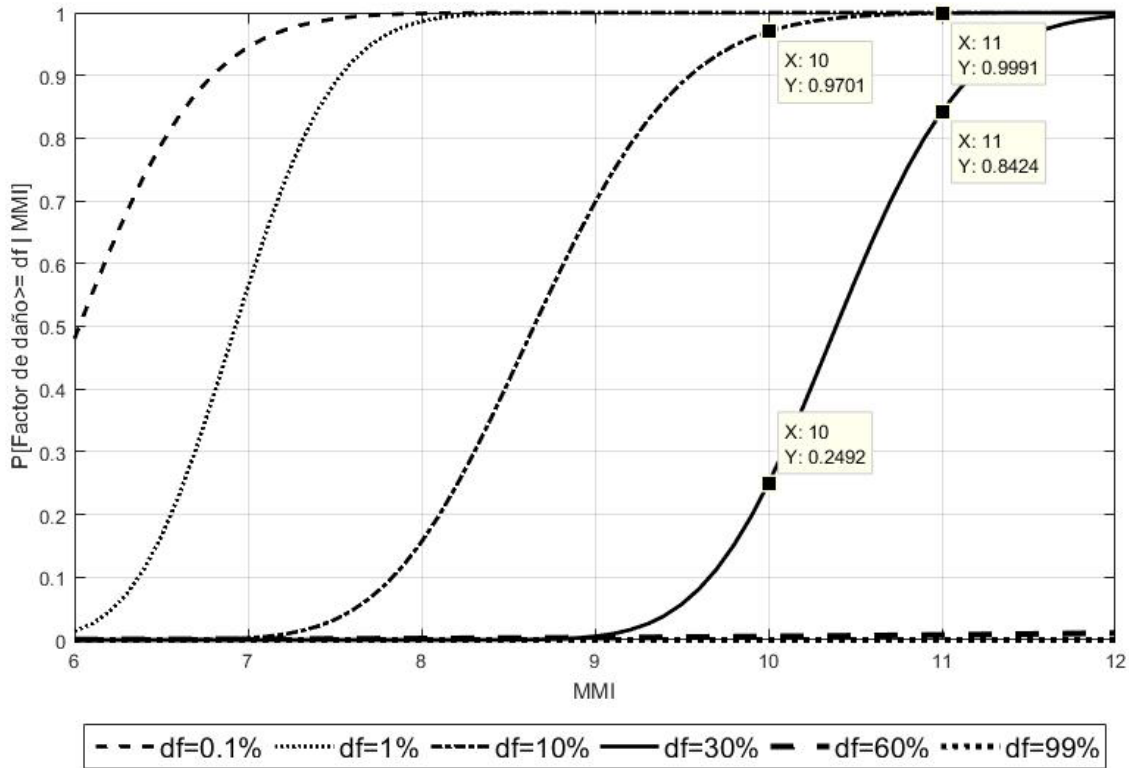
Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios propuestos, las Grúas que se encuentran sobre el espigón, tienen una probabilidad del 97% que presenten un daño del 10% (Daño Ligero) y un 27% de que ocurra un daño del 30% (Daño Moderado) ante un escenario de sismo X en la escala de MMI. No obstante, ante un escenario adverso de nivel XI en la escala de MMI, la probabilidad de recibir un daño del 30% o superior, aumenta al 92%. Además, existe una posibilidad cercana al 1% de presentar un daño del 60% (Daño Grave)

Las estructuras que entran dentro de esta categoría son las dos grúas Gottwald que se encuentran en el espigón. Ambas pueden presentar daños que pueden llegar a superar en un 60% los costos de reparación sobre los de reconstrucción en el escenario más adverso.

7.5.3. Estructuras de frente marino (Clasificación ATC =63)

Ilustración 7-8 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 63 – Estructuras de Frente Marino



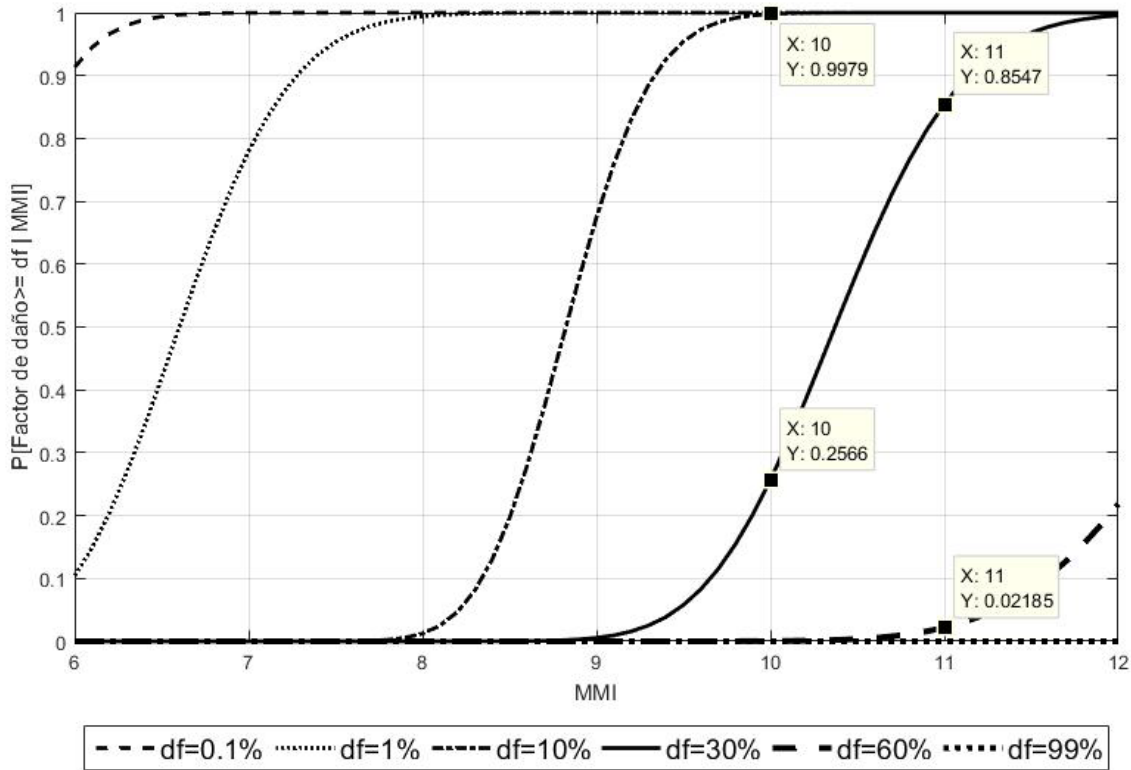
Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios propuestos, las estructuras de frente marino, ubicadas en las orillas del espigón, tienen una probabilidad del 97% que presenten un daño del 10% (Daño Ligero) y un 25% de que ocurra un daño del 30% (Daño Moderado) ante un escenario de sismo X en la escala de MMI. No obstante, ante un escenario adverso de nivel XI en la escala de MMI, la probabilidad de recibir un daño del 30% o superior, aumenta al 84%. Además, existe una posibilidad cercana al 1% de presentar un daño del 60% (Daño Grave)

Las estructuras que entran dentro de esta categoría son los bloques de hormigón con sus cotas de coronamiento correspondientes que, si bien conciernen todo el espigón, se estudia las secciones que tienen constante interacción con el oleaje de forma particular. Estos bloques pueden presentar daños que pueden llegar a superar en un 60% los costos de reparación sobre los de reconstrucción en el escenario más adverso.

7.5.4. Equipo de Oficina (Clasificación ATC =65)

Ilustración 7-9 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 65 – Equipo de Oficina



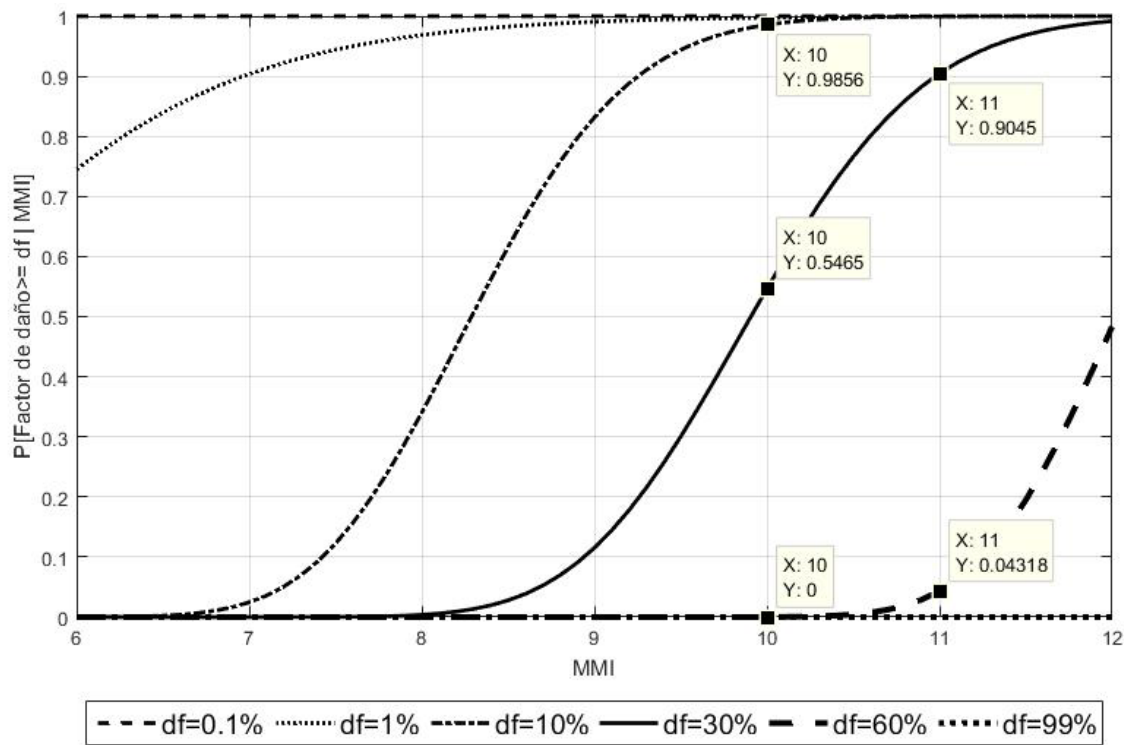
Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios propuestos, el equipo de oficina tiene una probabilidad del 100% que presenten un daño del 10% (Daño Ligero) y un 26% de que ocurra un daño del 30% (Daño Moderado) ante un escenario de sismo X en la escala de MMI. No obstante, ante un escenario adverso de nivel XI en la escala de MMI, la probabilidad de recibir un daño del 30% o superior, aumenta al 85%. Además, existe una posibilidad cercana al 2% de presentar un daño del 60% (Daño Grave)

Los recursos que entran dentro de esta categoría son todas las oficinas dispuestas en el espigón y el daño es en función de los costos de reparación de tabiquerías, muebles, escritorios, entre otros. Estos recursos pueden presentar daños que pueden llegar a superar en un 60% los costos de reparación sobre los de reconstrucción en el escenario más adverso.

7.5.5. Equipo Eléctrico (Clasificación ATC =66)

Ilustración 7-10 Análisis de Fragilidad – Clasificación ATC = 66 – Equipo Eléctrico



Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios propuestos, el equipo eléctrico tiene una probabilidad del 99% que presenten un daño del 10% (Daño Ligero) y un 55% de que ocurra un daño del 30% (Daño Moderado) ante un escenario de sismo X en la escala de MMI. No obstante, ante un escenario adverso de nivel XI en la escala de MMI, la probabilidad de recibir un daño del 30% o superior, aumenta al 90%. Además, existe una posibilidad cercana al 4% de presentar un daño del 60% (Daño Grave)

Los recursos que entran dentro de esta categoría son todas las instalaciones eléctricas dispuestas en el espigón, desde conexiones de uso común hasta los paneles de uso industrial, ubicados en algunos sectores del espigón. Estos recursos pueden presentar daños que pueden llegar a superar en un 60% los costos de reparación sobre los de reconstrucción en el escenario más adverso.

8. Análisis de Riesgo - Tsunami

8.1. Recopilación de antecedentes

Se recaudó información necesaria para la evaluación y generación de resultados debido a la falta de antecedentes anteriormente mencionada (ver capítulo 3.5.2), siendo las de mayor importancia las siguientes:

8.1.1. Informe de estabilidad grúas (propiedad de TCVAL)

Informe proporcionado por TCVAL (PRDW, 2014), en el que se evalúa la estabilidad del espigón del terminal 2 haciendo usos de dos grúas Gottwald en simultáneo, entregando las limitaciones de operación de ambas grúas, además de proporcionar características técnicas de la maquinaria

Su utilidad fue de carácter informativo, debido a que la estabilidad y la operatividad de las estructuras en condiciones normales no se encuentran dentro de los alcances.

8.1.2. Informe de modelación de tsunami en la costa de Valparaíso (Propiedad de TCVAL)

Informe proporcionado por TCVAL (TCVAL, 2016), en el que se presentan los resultados de una modelación del tsunami de 1730. Se entregan parámetros hidráulicos a lo largo de la costa del terminal 2 en diferentes instantes del escenario disruptivo.

Las profundidades alcanzadas van del orden de los 4.2[mNRS] a los 6 [mNRS]. Teniendo en cuenta que la cota de coronamiento del espigón es de 4[mNRS], las profundidades efectivas sobre las estructuras van desde los 0.2 [m] a los 2 [m].

8.1.3. Informe de Puerto de Iquique (DOP)

Resumen de proyectos de infraestructuras en el puerto de Iquique. En el documento se presentan estudios y criterios de diseños para los diferentes proyectos de la zona, considerando las probabilidades de fallas y escenarios sísmicos e hidrodinámicos.

8.1.4. Resumen de informes Privados, Puertos de la Octava Región (DOP)

Recopilación de antecedentes de los puertos y muelles de la Octava región. En el documento cuenta con descripciones de las estructuras portuarias y las fallas debido al escenario del 27-F. Lamentablemente, por falta de estudios técnicos y de investigación ha resultado difícil diferenciar el daño estructural provocado por el tsunami y el sismo.

8.1.5. Tsunami-induced Debris of Freight Containers due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Kento KUMAGAI

Investigación de Kumagai del terremoto de Tohoku, 2011 (Kumagai, 2013). El documento estudió el comportamiento de contenedores ante los escenarios de tsunami en las costas del pacífico de Japón. Se consideraron contenedores de 20' y 40' a diferentes cotas de inundación, calculando el daño que provoca la fuerza boyante y de arrastre de la onda de Tsunami.

8.1.6. Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan Tsunami, Anawat Suppasri

Elaboración de curvas de fragilidad debido a levantamiento en terreno y satelital, de daños debido al terremoto de 2011 en las costas de Japón. El daño se valorizó en función de la cota de inundación alcanzada en cada zona de estudio, cruzando los resultados con la materialidad de las estructuras y el daño alcanzado (Suppasri, 2012).

8.2. Matrices de daño

8.2.1. Generación de matrices de daño

Debido a la falta de modelación y data histórica de daños en el espigón y las estructuras sobre él, se cruzaron los antecedentes de daños recopilados con los parámetros hidráulicos de la modelación proporcionada por TCVAL.

De la lista de los elementos, estructuras y recursos mencionadas en el capítulo 4 se seleccionan las estructuras de las que se tienen registros y metodología para el cálculo del daño en la recopilación de antecedentes.

Se utilizó una metodología diferente para cada recurso, debido a las características propias de cada uno de ellos y sus formas de falla. El escenario modelado fue el de 1730, el cual presenta una altura de ola de 4.2 [m] a 6 [m] (Prof. 0.2[m] a 2 [m] sobre el espigón), siendo este parámetro e intervalo el que se utilizará para la confección de las matrices de daño.

Para valorizar el daño provocado para cada parámetro se propone lo estipulado en la Tabla 3-5

8.2.1.1. Grúa Gottwald GHMK 6407

La grúa Gottwald es considerada como una estructura firme ante un escenario de tsunami debido a que la fuerza boyante provocada por los parámetros hidrodinámicos es insuficiente para generar volcamiento o alguna inestabilidad (escenario estudiado sin considerar la estabilidad sísmica).

El principal foco de estudio es la ubicación de secciones importantes para la operación de la grúa tales como los 4 pads de apoyo, conexiones eléctricas e hidráulicas. Toda valorización del daño en este caso estará asociado a las reparaciones que deberá considerar la grúa para su correcto funcionamiento.

8.2.1.2. Contenedor de 20' y 40'

El espigón cuenta con una serie de sectores en los que se instalan contenedores de 40' apilados de a dos y tres elementos. Un escenario crítico es la temporada de la fruta, en la que destaca el uso de contenedores refrigerados de este tamaño. Además, el espigón cuenta con una serie de contenedores de 20' utilizados como oficinas y vestidores.

Para la generación de las matrices se utilizó la metodología propuesta en el capítulo 3.5.2.2

8.2.1.3. Estructuras de hormigón armado

Una de las dificultades mayores en un estudio de predicción de daño por tsunami es la separación de daños provocados por los efectos marítimos y sísmicos. Desde un punto de vista estructural, los elementos de hormigón armado que se encuentran en el espigón (sector cafetería y oficinas de control logístico del puerto) no debieran presentar daños significativos a nivel de colapso, esto solo pensando en los efectos hidrodinámicos.

Desde la recopilación de antecedentes se ha realizado un esfuerzo en valorizar el daño en función de las reparaciones necesarias para su operación en función de la cota de inundación, que llegado a cierto punto generan complicaciones en secciones no estructurales de las edificaciones y problemas eléctricos.

8.2.1.4. Paneles eléctricos

Al igual que en recursos anteriormente mencionados, se realiza una comparación entre los daños por tsunami en la recopilación de antecedentes en función del daño que este provoca en las instalaciones, sus requerimientos y las complicaciones que puedan presentar para su reparación.

8.2.2. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la valorización de daño para cada rango del parámetro hidráulico (profundidad de inundación), la suma de las probabilidades para cada profundidad debe ser del 100% considerando que todas las estructuras sufren algún tipo de daño según la Tabla 8-1

Tabla 8-1 Matrices de daño por recurso/estructura

Grúa Gottwald GHMK-6407						Oficinas Contenedor 20' Pila Individual - Carga Ligera					
Damage Level	Profundidad[mNRS]					Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6		4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,9	0,6	0,3	0	1	0,9	0,3	0	0	0
2	0	0,1	0,3	0,5	0,5	2	0,1	0,6	0,2	0	0
3	0	0	0,1	0,2	0,3	3	0	0,1	0,6	0,2	0
4	0	0	0	0	0,2	4	0	0	0,2	0,8	1
5	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0

Contenedor 40' Pila Individual - Vacía						Contenedor 40' Pila Individual - Con Carga					
Damage Level	Profundidad[mNRS]					Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6		4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,6	0	0	0	1	1	0,9	0	0	0
2	0	0,4	0,6	0	0	2	0	0,1	0,8	0	0
3	0	0	0,4	0,8	0	3	0	0	0,1	0,8	0
4	0	0	0	0,2	1	4	0	0	0,1	0,2	1
5	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0

Contenedor 40'
 Pila Doble - Vacío

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,7	0	0	0
2	0	0,3	0,5	0	0
3	0	0	0,5	0,6	0
4	0	0	0	0,4	1
5	0	0	0	0	0

Contenedor 40'
 Pila Doble - Con Carga

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	1	0,8	0	0
2	0	0	0,2	0,6	0
3	0	0	0	0,3	0,5
4	0	0	0	0,1	0,5
5	0	0	0	0	0

Cafetería
 Panel Electrico

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	0,8	0,2	0	0	0
2	0,2	0,7	0,8	0,1	0
3	0	0,1	0,2	0,8	0,6
4	0	0	0	0,1	0,4
5	0	0	0	0	0

Panel Eléctrico
 Sitio 8

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	0,8	0,2	0	0	0
2	0,2	0,7	0,5	0	0
3	0	0,1	0,3	0,7	0,5
4	0	0	0,2	0,3	0,5
5	0	0	0	0	0

Oficinas
 Zona de Ingreso

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,9	0,5	0,3	0
2	0	0,1	0,4	0,5	0,6
3	0	0	0,1	0,2	0,3
4	0	0	0	0	0,1
5	0	0	0	0	0

8.3. Curvas de fragilidad

Desde la Ilustración 8-1 a la Ilustración 8-9 se presentan las curvas elaboradas según la metodología propuesta en el capítulo 5.1.2 del presente documento. Las matrices de daño de probabilidad acumulada, necesarias para la confección de estos resultados se pueden encontrar en el Anexo D.

Ilustración 8-1 Curva de Fragilidad - Grúa Gottwald

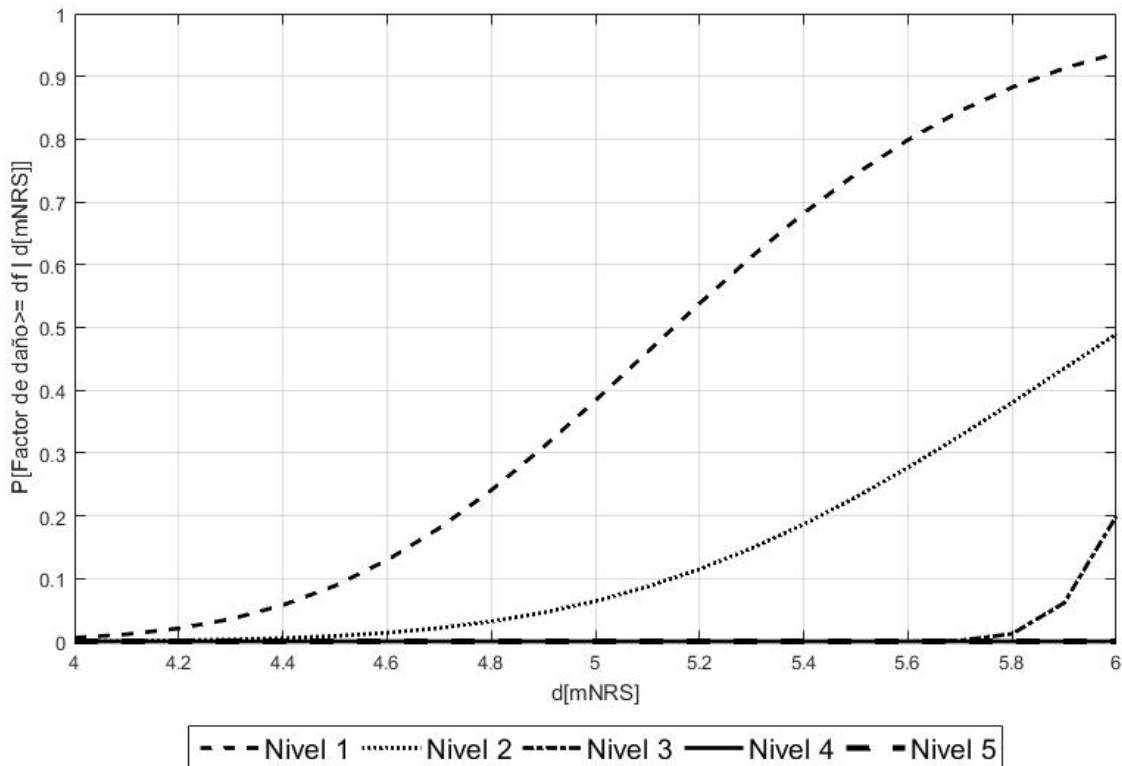


Tabla 8-2 Parámetros de distribución LogNormal para Grúa Gottwald

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,639	1,795	1,812	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,100	0,122	0,024	0,054	0,054

Ilustración 8-2 Curva de Fragilidad – Oficina Contenedor – Carga ligera

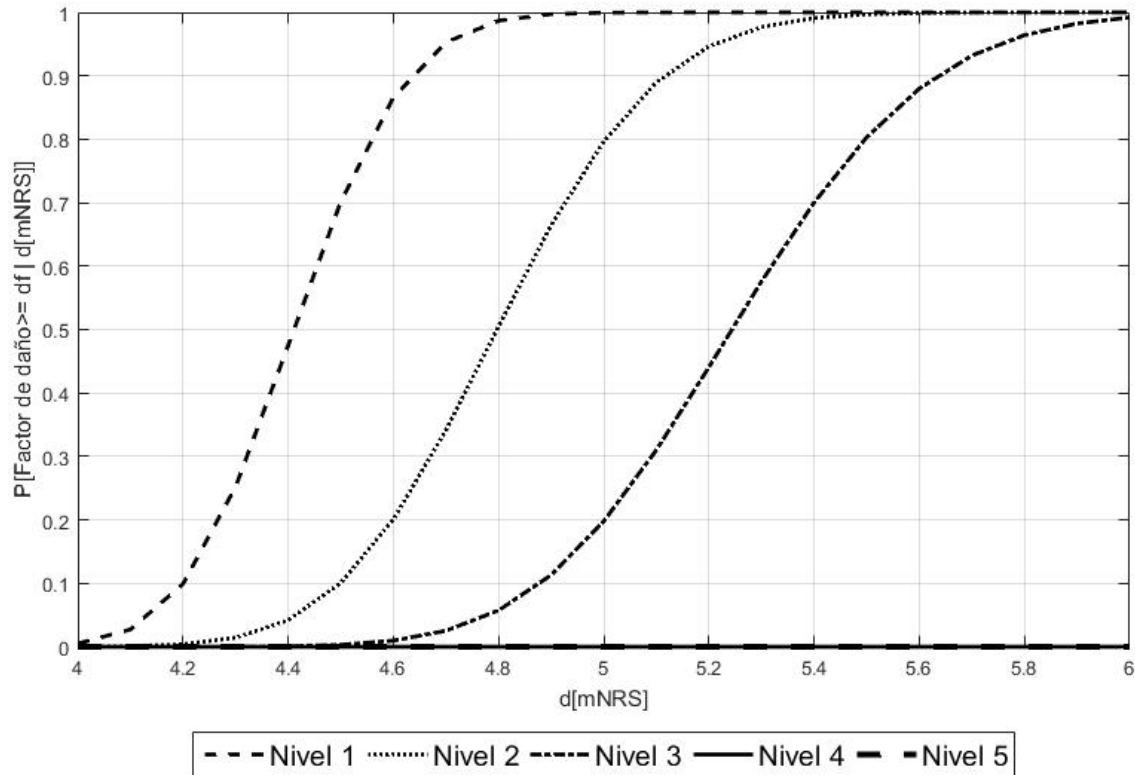


Tabla 8-3 Parámetros de distribución LogNormal para Oficina Contenedor - Carga ligera

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de $\ln(d)$	1,484	1,568	1,657	2,000	2,000
Desviación Estandar de $\ln(d)$	0,038	0,050	0,056	0,054	0,054

Ilustración 8-3 Curva de Fragilidad – Contenedor 40' – Pila Individual - Vacía

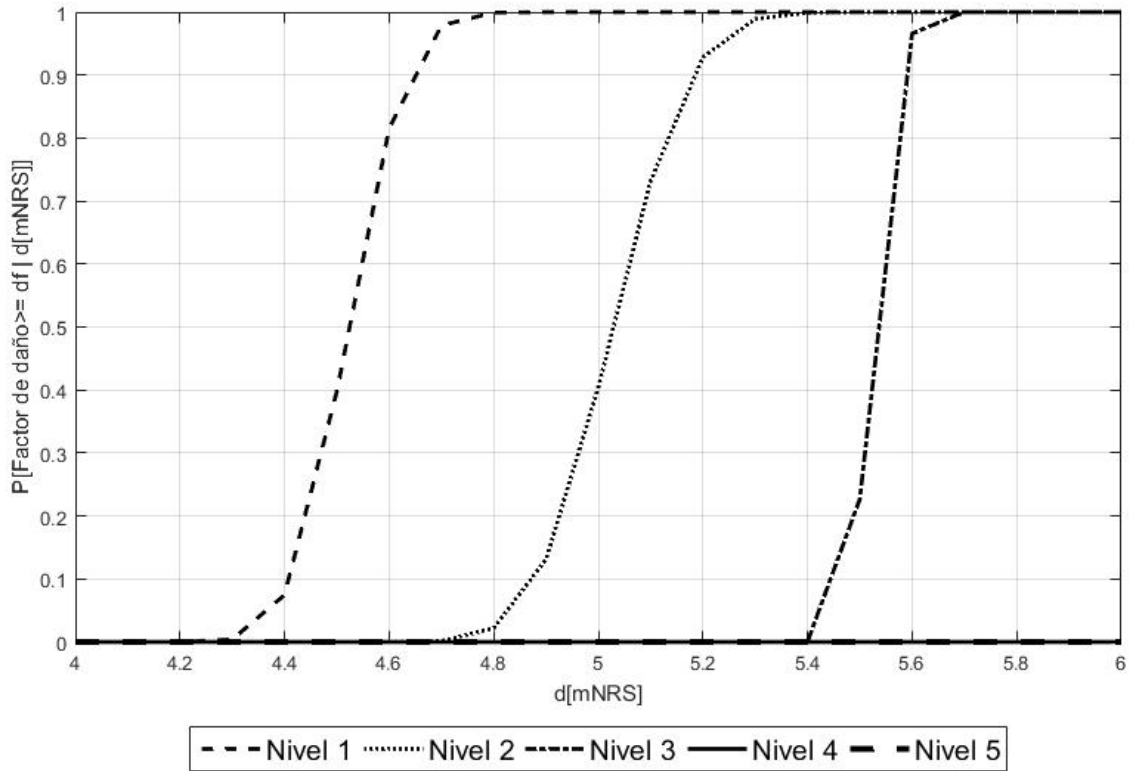


Tabla 8-4 Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40' – Pila Individual – Vacía

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,509	1,615	1,710	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,019	0,023	0,007	0,054	0,054

Ilustración 8-4 Curva de Fragilidad – Contenedor 40’ – Pila Individual – Con Carga

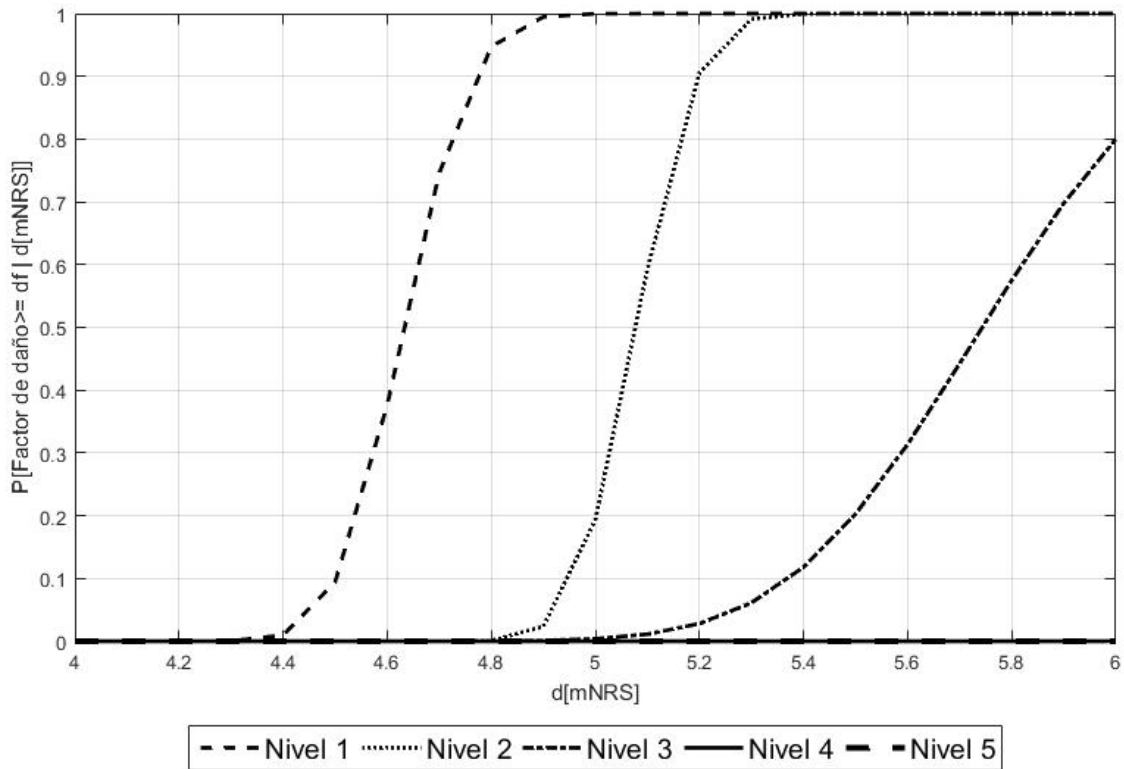


Tabla 8-5 Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40’ – Pila Individual – Con Carga

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,533	1,625	1,748	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,022	0,018	0,052	0,054	0,054

Ilustración 8-5 Curva de Fragilidad – Contenedor 40' –Pila Doble – Vacía

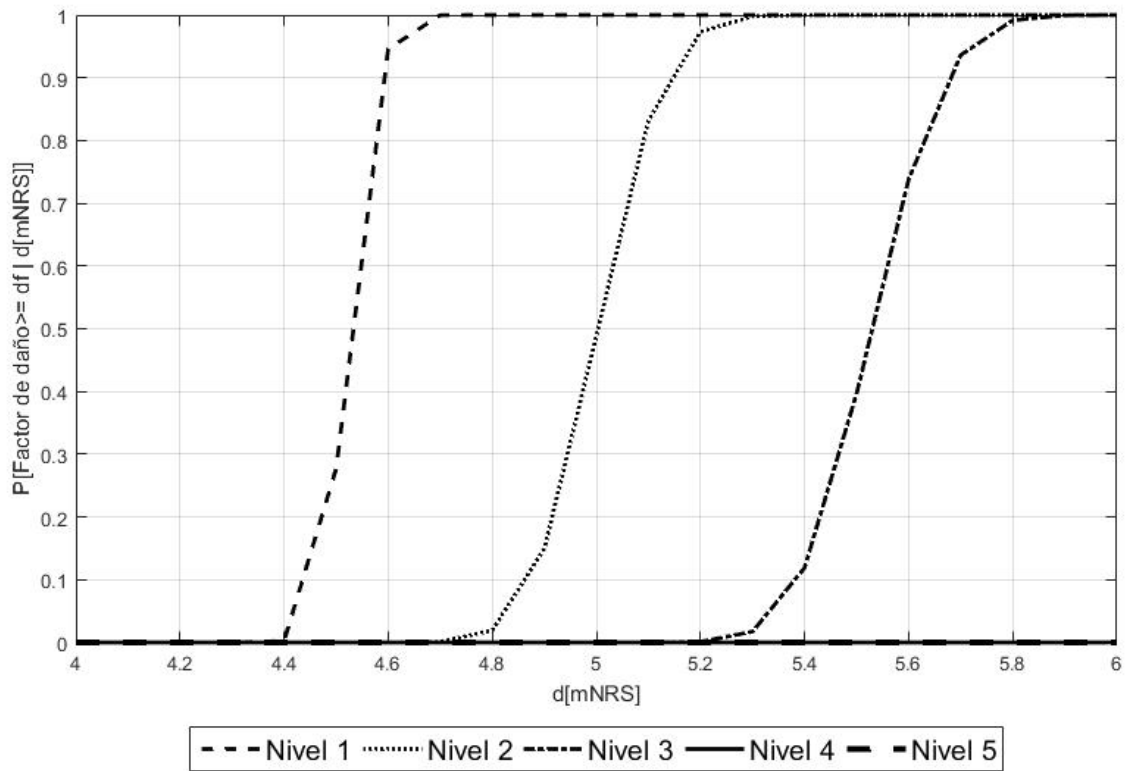


Tabla 8-6 Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40' – Pila Doble – Vacía

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,511	1,609	1,710	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,014	0,015	0,022	0,054	0,054

Ilustración 8-6 Curva de Fragilidad – Contenedor 40' –Pila Doble – Con Carga

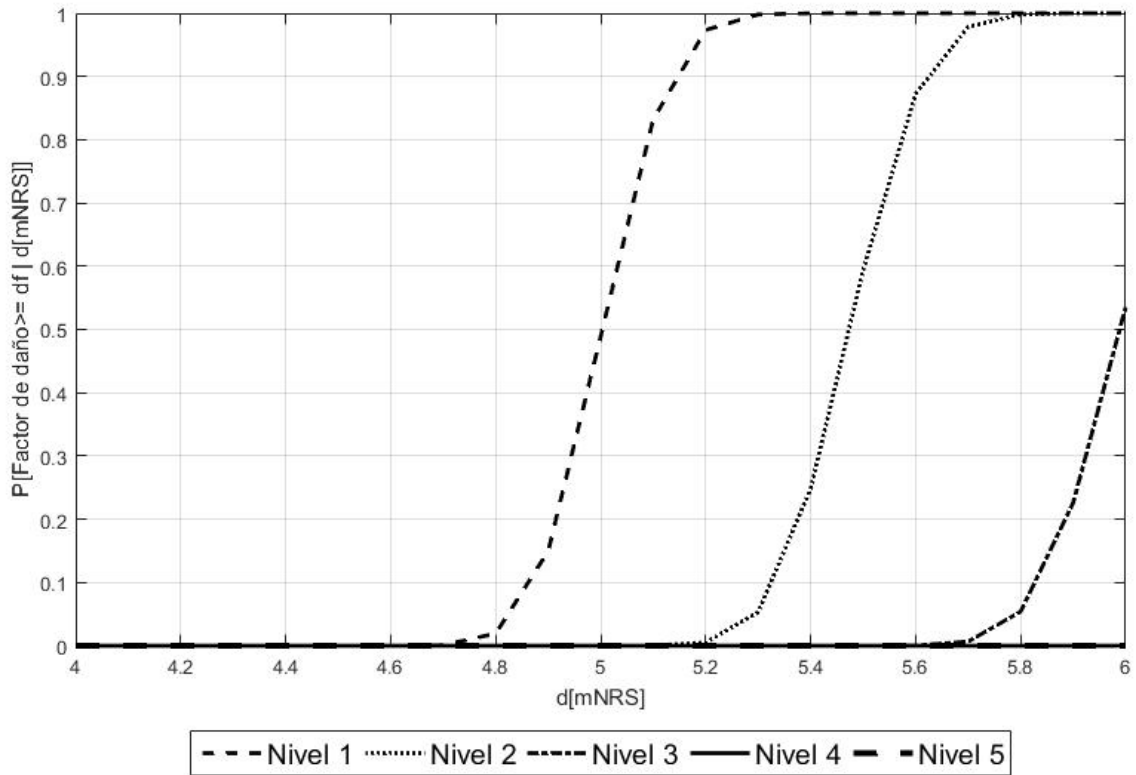


Tabla 8-7 Parámetros de distribución LogNormal para Contenedor 40' – Pila Doble – Con Carga

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,615	1,705	1,792	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,021	0,020	0,022	0,054	0,054

Ilustración 8-7 Curva de Fragilidad – Cafetería – Panel Eléctrico

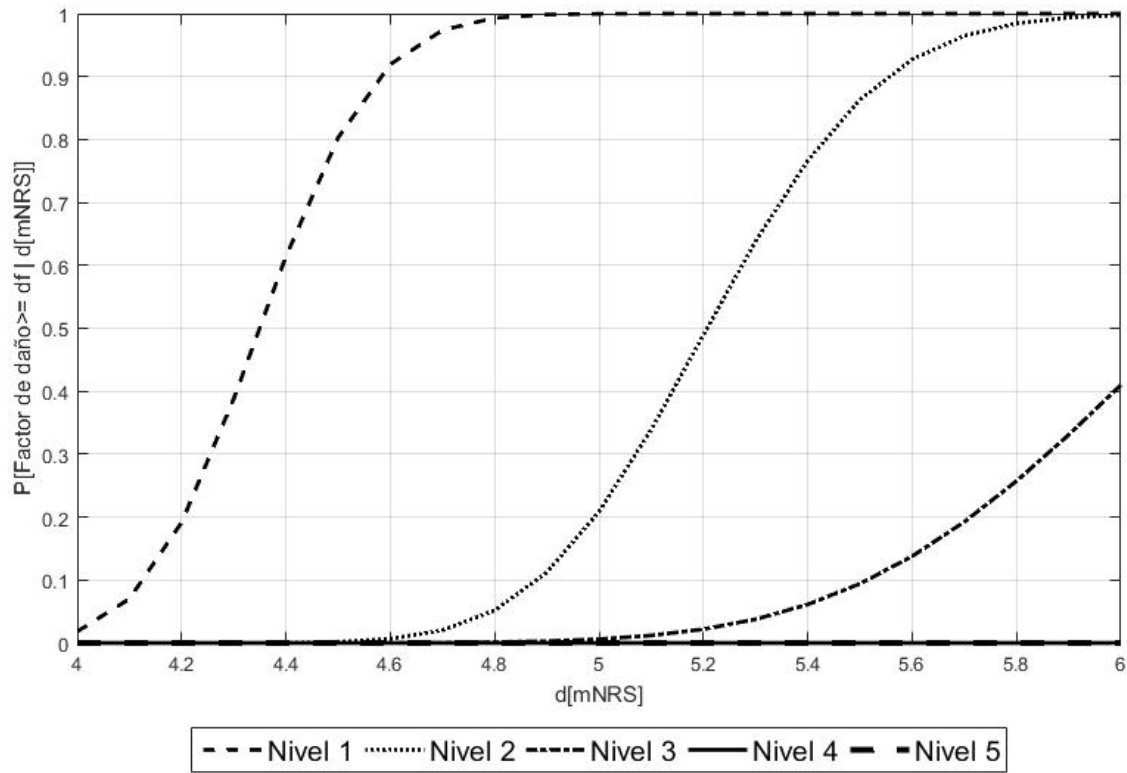


Tabla 8-8 Parámetros de distribución LogNormal para Cafetería – Panel Eléctrico

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,470	1,647	1,813	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,041	0,045	0,084	0,054	0,054

Ilustración 8-8 Curva de Fragilidad – Sitio 8 – Panel Eléctrico

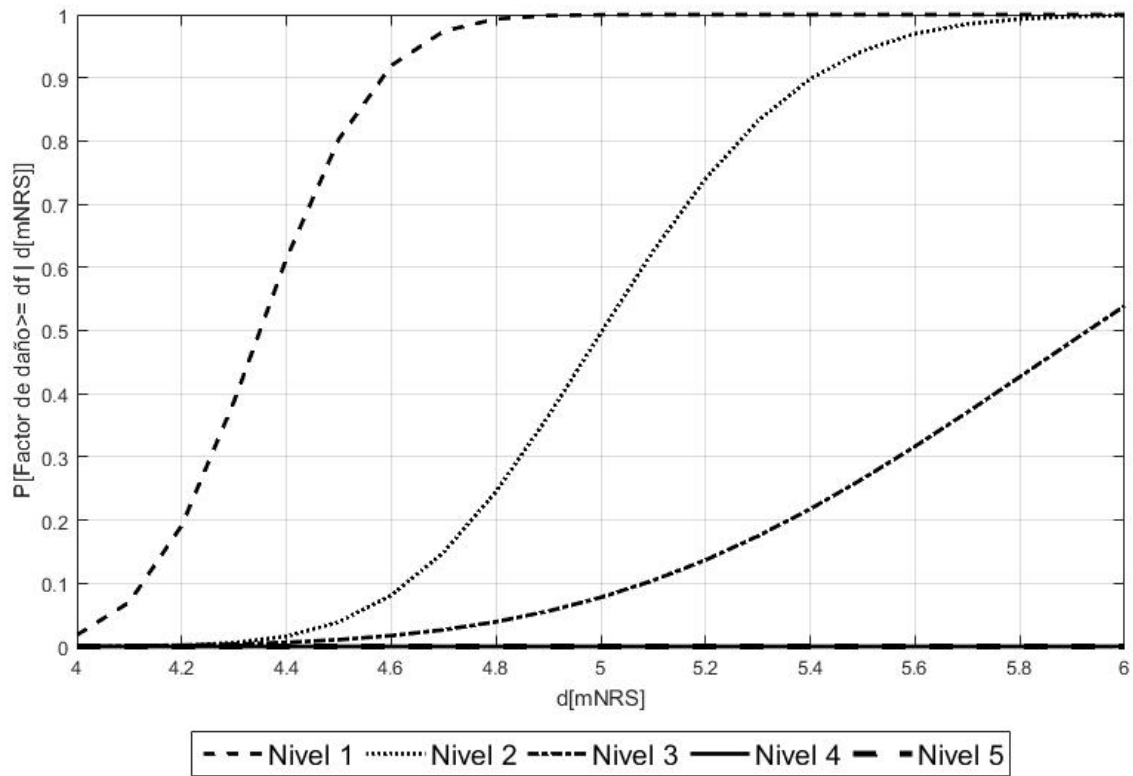


Tabla 8-9 Parámetros de distribución LogNormal para Sitio 8 – Panel Eléctrico

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,470	1,605	1,785	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,041	0,061	0,116	0,054	0,054

Ilustración 8-9 Curva de Fragilidad – Oficinas – Zona de Ingreso

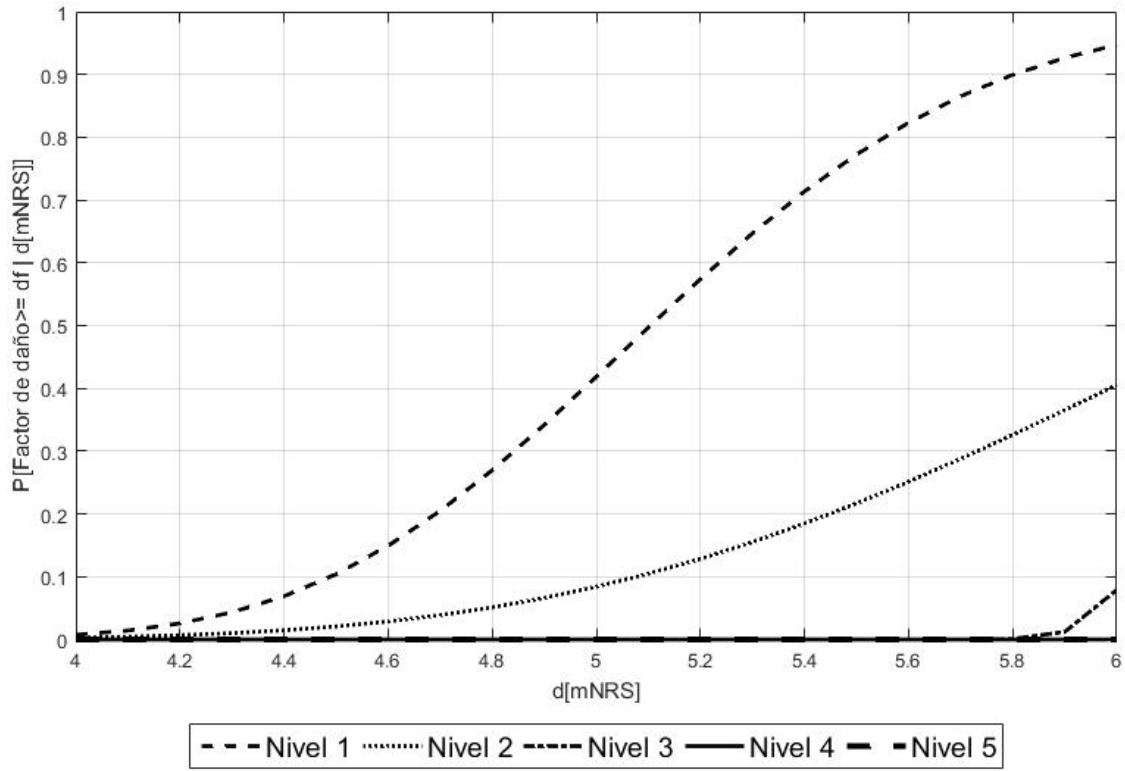


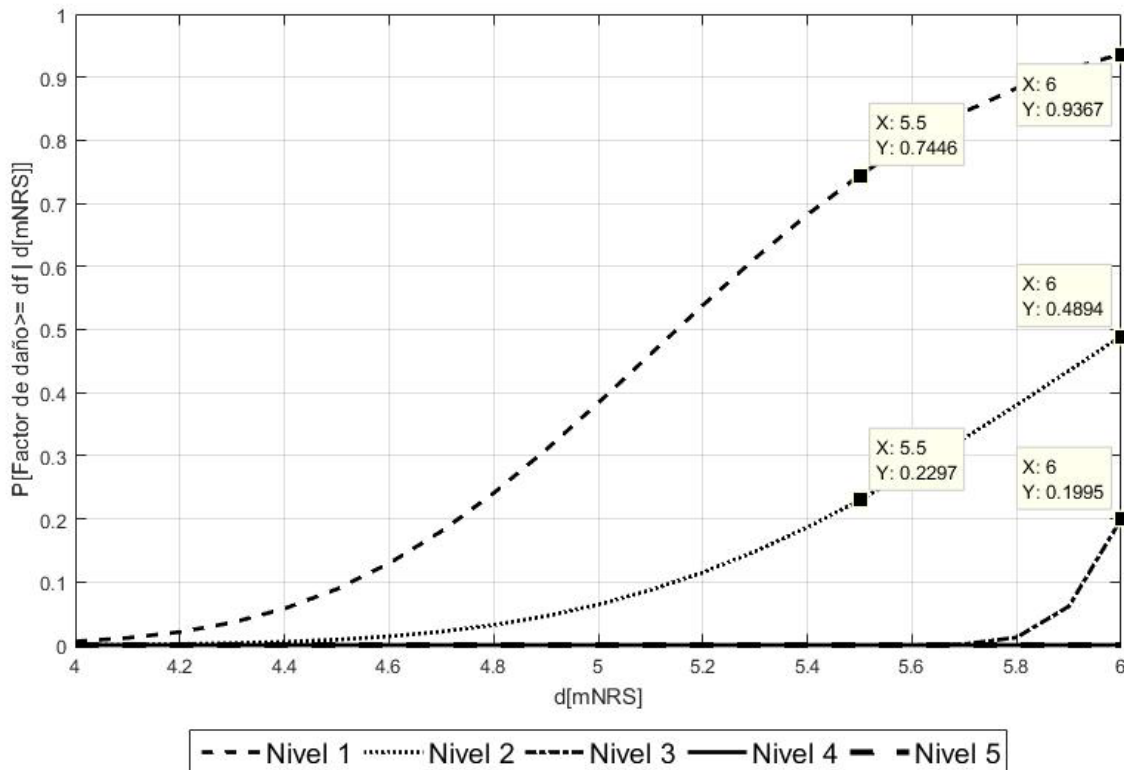
Tabla 8-10 Parámetros de distribución LogNormal para Oficinas – Zona de Ingreso

Factor de daño [%]	1	2	3	4	5
Promedio de Ln(d)	1,625	1,833	1,823	2,000	2,000
Desviación Estandar de Ln(d)	0,105	0,159	0,024	0,054	0,054

8.4. Análisis de resultados

8.4.1. Grúa Gottwald

Ilustración 8-10 Análisis de Fragilidad – Grúa Gottwald



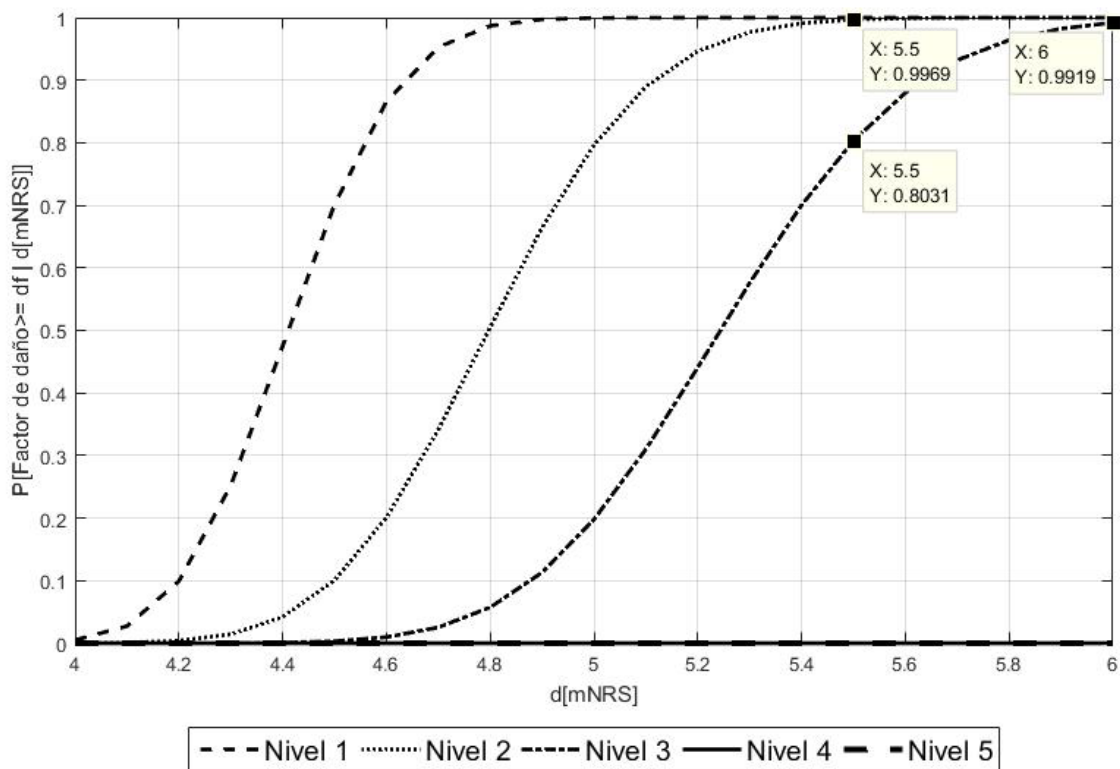
Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios propuestos, las grúas ubicadas en el espigón tienen, en el caso más adverso, un 94% de probabilidad de sufrir un daño de nivel 1 (mínimo) o superior, un 49% de probabilidad de sufrir un daño de nivel 2 (moderado) o superior y un 20% de probabilidad de sufrir un daño de nivel 3 (significativo) o superior. Para el caso de la segunda onda de arribo hay un 74% de probabilidad de sufrir un daño mayor a 1 y un 23% de encontrar daños superiores a 2, dejando al mínimo las probabilidades de otros niveles de daño. La ausencia de daños de niveles superiores a 3 en estos resultados se debe a que la maquinaria principal de la grúa se encuentra en altura teniendo solo la superficie como zona crítica de cuidado. Los daños pueden incurrir desde falla y/o desperfectos eléctricos o hidráulicos en el mecanismo de apoyo y traslado de la grúa.

Como medida resiliente se propone realizar constantemente los correspondientes cuidados a los aceites de la maquinaria y los aislamientos de las conexiones eléctricas, además de una limpieza química profunda a los equipos críticos posterior al desastre, debido a la probabilidad de acumulación de sales que fomentan la corrosión y la oxidación en los elementos de mayor importancia.

8.4.2. Oficina Contenedor – Carga Ligera

Ilustración 8-11 Análisis de Fragilidad – Oficina Contenedor – Carga Ligera



Fuente: Elaboración propia

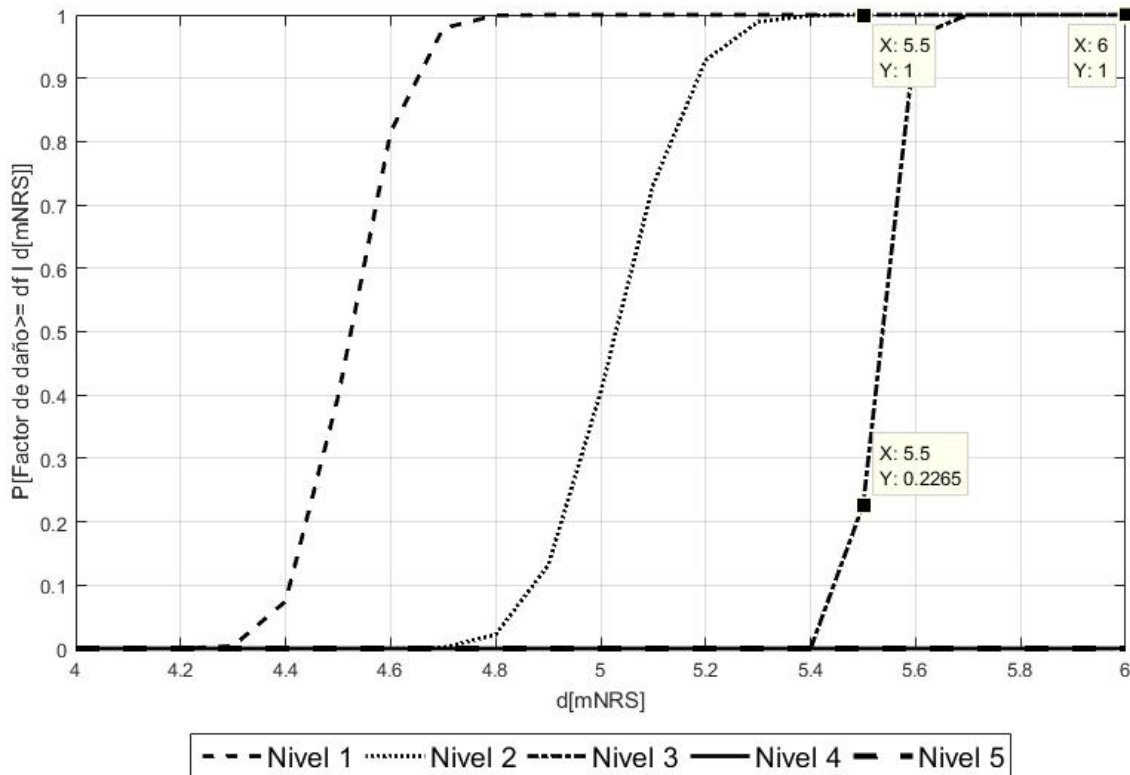
Para los escenarios propuestos, los contenedores de 20' dispuestos como oficinas en el espigón, tienen prácticamente un 100% de probabilidad de sufrir daño igual o mayor al nivel 3 (significativos), mientras que para el caso de profundidad de 5.5 [mNRS] esta probabilidad desciende al 80% teniendo mayores posibilidades de sufrir daños de nivel 2 (moderado).

Los daños de nivel 4 y 5, para los casos de contenedores, no son considerados debido a que se supone como daño los costos cuando se requiere retirar, trasladar o reflotar estos materiales. En un escenario adverso estos no pueden ser reutilizados encontrando fácilmente remplazos en el mercado.

Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda instalar anclas de amarre para estas estructuras para que en situaciones en que la boyantes sea mayor al peso del elemento y este no funcione como proyectil sobre otra estructura. Esto es debido a que los contenedores de 20' son los de menor tamaño y peso siendo fácilmente arrastrados por las corrientes en escenario boyante.

8.4.3. Contenedor 40' – Pila Individual – Vacía

Ilustración 8-12 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40' – Pila Individual – Vacía



Fuente: Elaboración propia

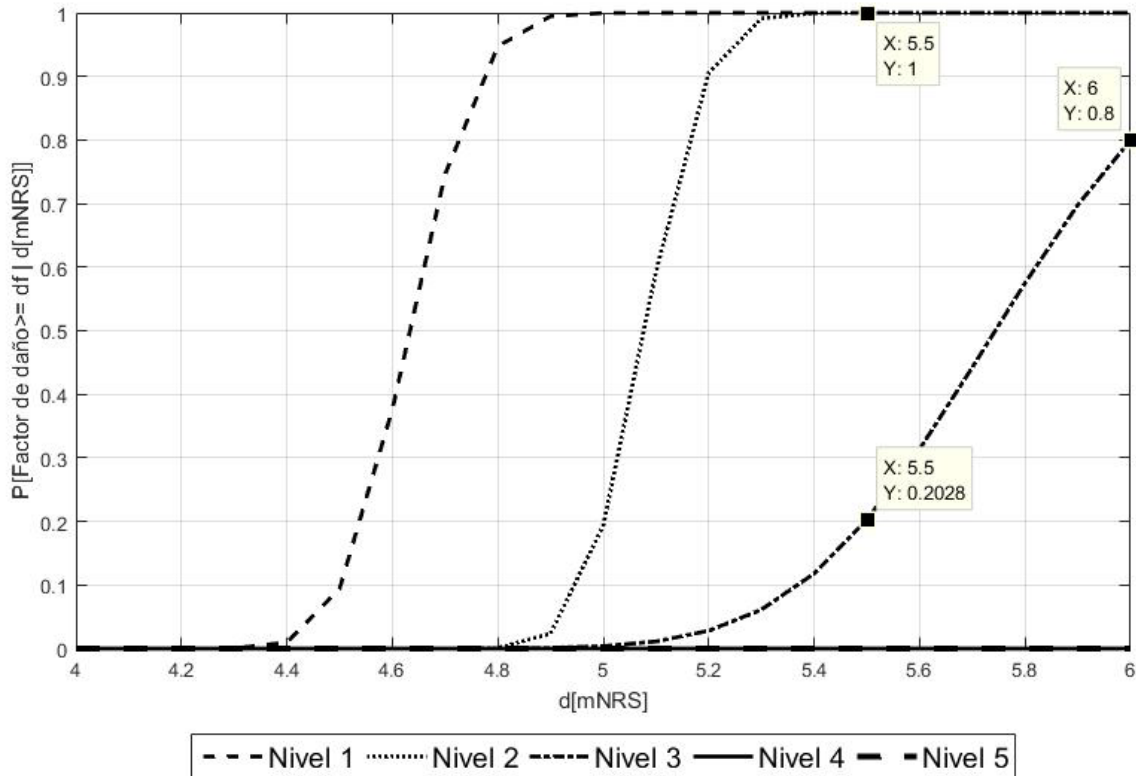
Para los escenarios propuestos, los Contenedores de 40' dispuestos en solitario en el espigón y a lo largo del terminal, tienen prácticamente un 100% de probabilidad de sufrir daño igual o mayor al nivel 3 (significativos), mientras que para el caso de profundidad de 5.5 [mNRS] esta probabilidad desciende al 22% teniendo mayores posibilidades de sufrir daños de nivel 2 (moderado).

Los daños de nivel 4 y 5, para los casos de contenedores, no son considerados debido a que se supone como daño los costos cuando se requiere retirar, trasladar o reflotar estos elementos. En un escenario adverso estos no pueden ser reutilizados encontrando fácilmente reemplazos en el mercado.

Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda depositar estos contenedores en zonas donde estos no impacten estructuras en escenario boyante, debido a que esto puede aumentar los costos asociados a reparación del elemento y la estructura impactada. Esto es a causa de lo ligero que es el elemento no teniendo fuerzas restitutivas suficientes para mantener el equilibrio, logrando trasladarse varios metros durante el escenario disruptivo.

8.4.4. Contenedor 40' – Pila Individual – Con Carga

Ilustración 8-13 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40' – Pila Individual – Con Carga



Fuente: Elaboración propia

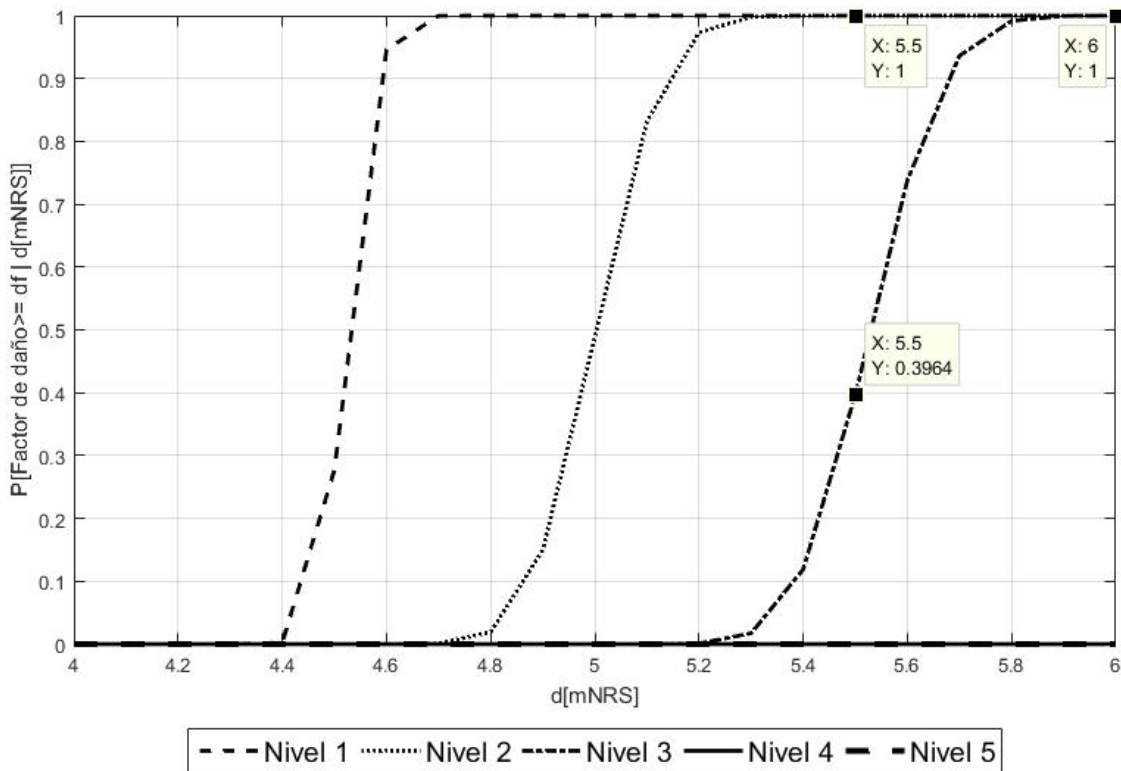
Para los escenarios propuestos, los Contenedores de 40' dispuestos en solitario en el espigón y a lo largo del terminal, tienen prácticamente un 80% de probabilidad de sufrir daño igual o mayor al nivel 3 (significativos), mientras que para el caso de profundidad de 5.5 [mNRS] esta probabilidad desciende al 20% teniendo mayores posibilidades de sufrir daños de nivel 2 (moderado).

Los daños de nivel 4 y 5, para los casos de contenedores, no son considerados debido a que se supone como daño los costos cuando se requiere retirar, trasladar o reflotar estos materiales. En un escenario adverso estos no pueden ser reutilizados encontrando fácilmente reemplazos en el mercado.

Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda depositar estos contenedores en grupos debido a que, a mayor peso, menor es la probabilidad de daño por boyantes y desequilibrio como se observa en análisis posteriores.

8.4.5. Contenedor 40' – Pila Doble – Vacía

Ilustración 8-14 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40' – Pila Doble – Vacía



Fuente: Elaboración propia

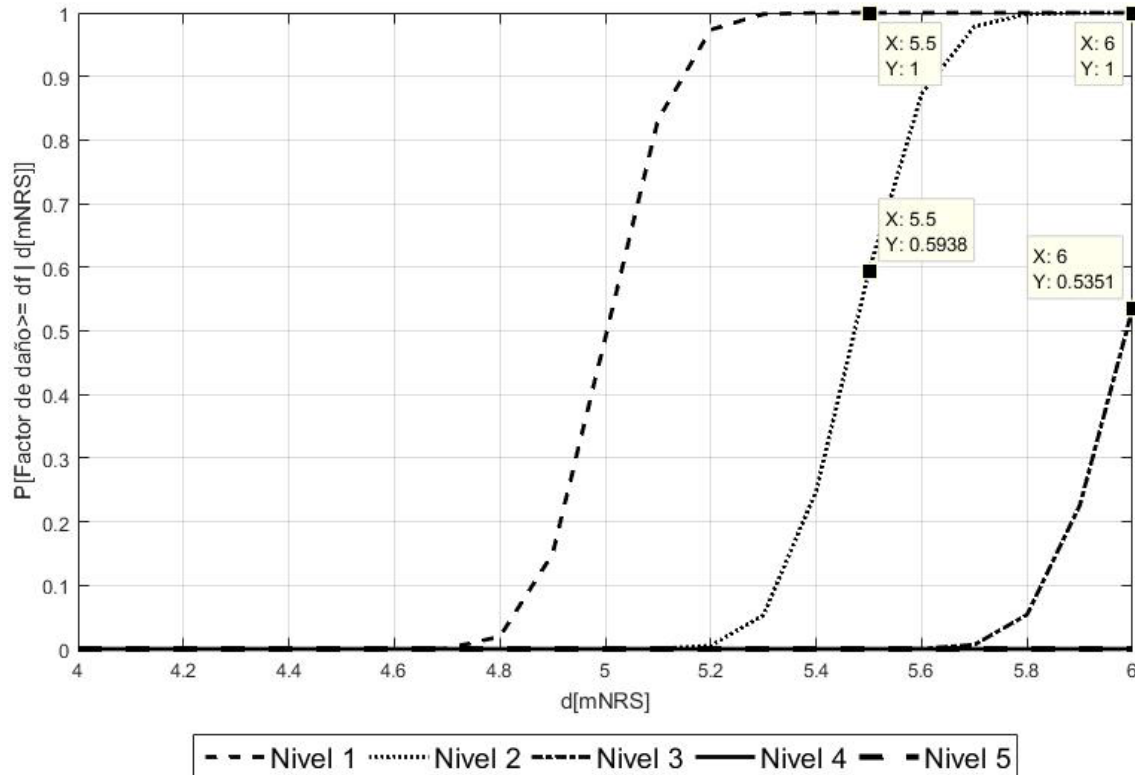
Para los escenarios propuestos, los Contenedores de 40' apilados en el espigón y a lo largo del terminal, tienen prácticamente un 100% de probabilidad de sufrir daño igual o mayor al nivel 3 (significativos), mientras que para el caso de profundidad de 5.5 [mNRS] esta probabilidad desciende al 40% teniendo mayores posibilidades de sufrir daños de nivel 2 (moderado).

Los daños de nivel 4 y 5, para los casos de contenedores, no son considerados debido a que se supone como daño los costos cuando se requiere retirar, trasladar o rebotar estos materiales. En un escenario adverso estos no pueden ser reutilizados encontrando fácilmente reemplazos en el mercado.

Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda depositar estos contenedores en zonas donde estos no impacten estructuras en escenario boyante, debido a que esto puede aumentar los costos asociados a reparación del elemento y la estructura impactada. Esto es a causa de lo ligero y alto que es el elemento, no teniendo fuerzas restitutivas suficientes para mantener el equilibrio, logrando trasladarse de manera desordenada y separada, varios metros durante el escenario disruptivo.

8.4.6. Contenedor 40' – Pila Doble – Con Carga

Ilustración 8-15 Análisis de Fragilidad – Contenedor 40' – Pila Doble – Con Carga



Fuente: Elaboración propia

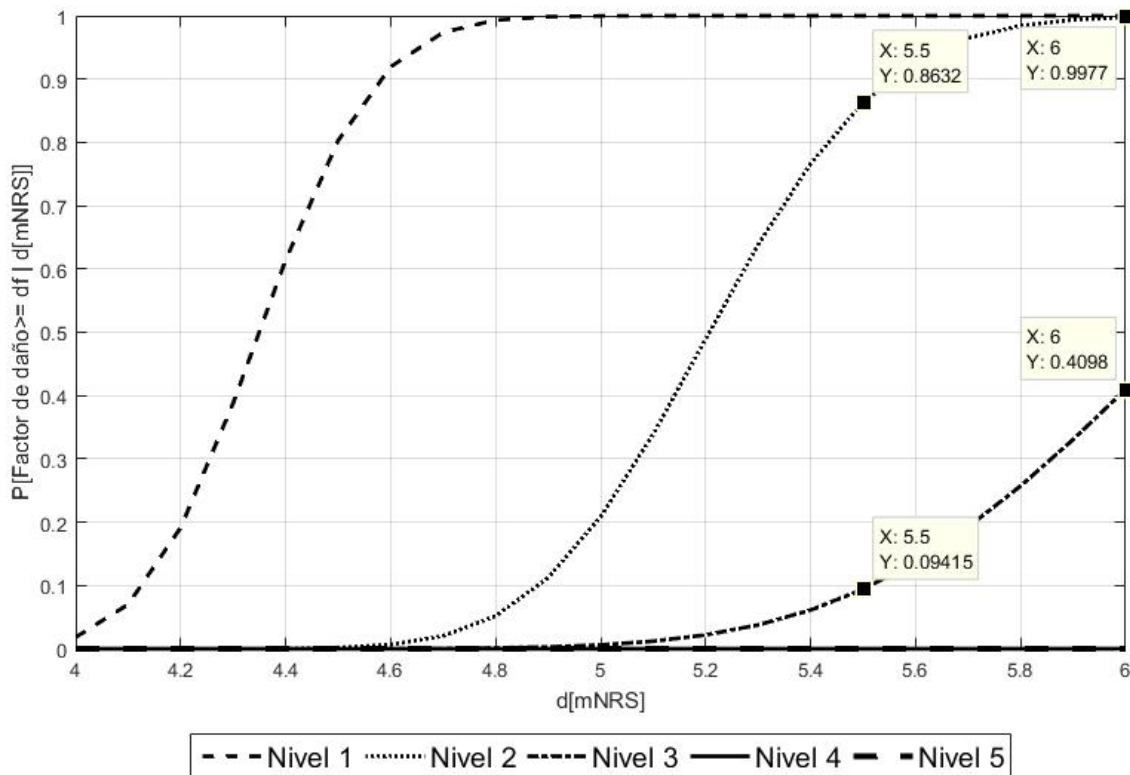
Para los escenarios propuestos, los Contenedores de 40' apilados en el espigón y a lo largo del terminal, tienen prácticamente un 54% de probabilidad de sufrir daño igual o mayor al nivel 3 (significativos), mientras que para el caso de profundidad de 5.5 [mNRS] esta probabilidad desciende al 0% teniendo un 59% de probabilidades de sufrir daños de nivel 2 (moderado) o mayor.

Los daños de nivel 4 y 5, para los casos de contenedores, no son considerados debido a que se supone como daño los costos cuando se requiere retirar, trasladar o reflotar estos materiales. En un escenario adverso estos no pueden ser reutilizados encontrando fácilmente reemplazos en el mercado.

En general elementos de este tamaño cargados con a lo menos la mitad de capacidad de carga suelen ser lo suficientemente estables como para resistir profundidades como las del escenario disruptivo, de todas formas, esto puede cambiar dependiendo de las velocidades del flujo, pues las fuerzas dinámicas pueden provocar una inestabilidad lo suficientemente significativa como para volcar el elemento estudiado. Se recomienda considerar este tipo de apilamiento, sobre el de tres elementos o menos en caso de contenedores vacíos, en zonas donde la onda impacte directamente con la cota de coronamiento (sector donde se registran mayores velocidades).

8.4.7. Cafetería – Panel Eléctrico

Ilustración 8-16 Análisis de Fragilidad – Cafetería – Panel Eléctrico



Fuente: Elaboración propia

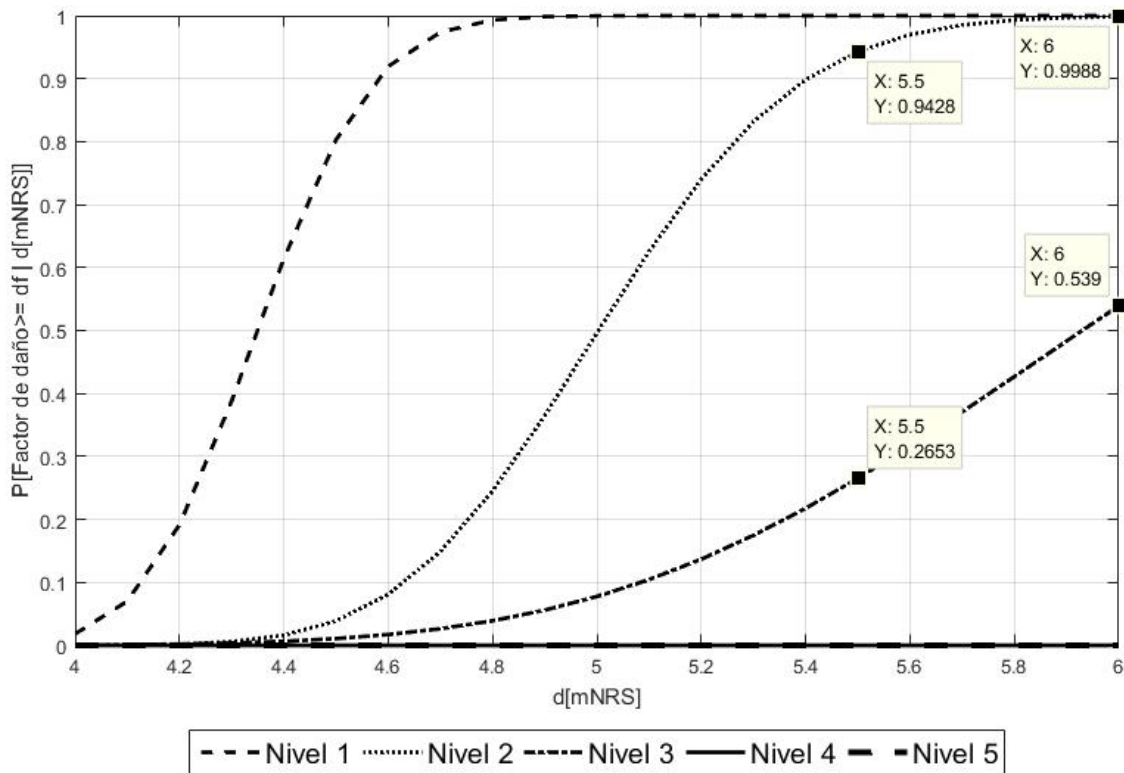
Para los escenarios propuestos, el panel eléctrico ubicado al centro del espigón a un costado del edificio dispuesto como cafetería, tiene prácticamente un 40% de probabilidad de sufrir daño igual o mayor al nivel 3 (significativos), mientras que para el caso de profundidad de 5.5 [mNRS] esta probabilidad desciende al 10% teniendo un 86% de probabilidades de sufrir daños de nivel 2 (moderado) o mayor.

Los daños que puede causar la profundidad del tsunami no hacen diferencia sobre la cota de 2 metros de inundación, pues se considera que el sector se encuentra completamente húmedo aumentando las posibilidades de corto circuito y algún otro tipo de falla.

Se recomienda mantener constantemente aislado, resguardando que el sector no sufra mayores complicaciones más que la zona húmeda esperada (evitar golpes por contenedores o algún otro de masa considerable ante un escenario de inundación mayor). Para ello se propone la construcción de una caseta de hormigón armado donde se puede aminorar el daño por este tipo de impacto y evitando reparaciones complejas posterior al escenario disruptivo.

8.4.8. Sitio 8 – Panel Eléctrico

Ilustración 8-17 Análisis de Fragilidad – Sitio 8 – Panel Eléctrico



Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios propuestos, el panel eléctrico ubicado en el sitio 8 del espigón, tiene prácticamente un 54% de probabilidad de sufrir daño igual o mayor al nivel 3 (significativos), mientras que para el caso de profundidad de 5.5 [mNRS] esta probabilidad desciende al 27% teniendo un 94% de probabilidades de sufrir daños de nivel 2 (moderado) o mayor.

Los daños que puede causar la profundidad del tsunami tienen a ser mayores que en caso anterior, debido a la estructura que se utiliza para el alimento de energía, siendo este más inestable.

Se recomienda mantener constantemente aislado, resguardado que el sector no sufra mayores complicaciones, más que la zona húmeda esperada (evitar golpes por contenedores o algún otro de masa considerable). Para ello se propone la construcción de una caseta de hormigón armado donde se puede aminorar el daño por este tipo de impacto y evitando reparaciones complejas posterior al escenario disruptivo.

9. Conclusiones

9.1. Análisis de riesgo – Sismo

9.1.1. Sobre los Antecedentes

Los antecedentes de daños de infraestructura en los puertos de la octava región y el puerto de Iquique entregan una aproximación del daño esperado para un determinado escenario, pero son insuficientes para generar una base de datos estadística de daño ante diversos escenarios disruptivos. Estos no entregan mayores antecedentes sobre el tipo de suelo donde se fundan las estructuras y tampoco sobre el estado de las estructuras antes del escenario disruptivo.

Esta falta de información se repite a lo largo de las grandes infraestructuras portuarias de Chile debido a la longevidad de estas y la pérdida de documentos a lo largo de los años. Se propone para estudios posteriores, valorizar el daño y categorizar las estructuras, realizando así un levantamiento estandarizado que permita recopilar toda la información a nivel nacional para el uso local de cada puerto.

Se recomienda aplicar esta metodología con una base de datos estadística nacional, siguiendo la metodología propuesta en el ATC-13, que, aplicando el Método Delphi, genera una base estadística del comportamiento sísmico de diferentes estructuras y recursos.

9.1.2. Sobre la Metodología

Las curvas de fragilidad proporcionan la valorización del daño esperado ante un escenario disruptivo. Esto permite tomar decisiones claves para la elaboración de estrategias de continuidad haciendo imperativo su uso en estudios de riesgos estructural en instalaciones portuarias.

La metodología propuesta por Anagnos, entrega una primera aproximación probabilística abaratando costos de modelos estructurales, debido a que utiliza la evaluación de expertos recopilada en el ATC-13. Esta información, aunque no tenga evaluación de estructuras nacionales en sus registros, se puede complementar con antecedentes y análisis de daños a nivel local teniendo una mejor idea del daño esperado y las obras de mitigación necesarias disminuir al mínimo el tiempo de recuperación.

No obstante, se identifican las siguientes debilidades a la metodología utilizada:

- i) La escala MMI no tiene información sobre las aceleraciones máximas del registro esperado. En palabras simples, no se tiene claridad sobre la dirección, distancia de la falla y magnitud del sismo que podría provocar los daños estimados, haciendo de esta metodología una propuesta cualitativa y de referencia para la elaboración de estrategias de continuidad.
- ii) La falla sobre las estructuras de frente marino (el espigón) contempla el daño estructural sobre él, pero no el asentamiento que este pueda sufrir. La falla por el tipo de suelo no está considerada en la metodología haciendo que el fenómeno de licuefacción no esté dentro de los alcances del estudio. El asentamiento del espigón puede provocar daño sobre la losa de hormigón y los recursos sobre este, haciendo inoperativo su uso.

9.1.3. Sobre los resultados

En general las estructuras analizadas pueden llegar presentar un daño del 60% según la escala propuesta en la Tabla 3-3. Cada recurso o estructura tiene una conclusión y recomendación acorde lo obtenido en cada curva de fragilidad.

9.1.3.1. Edificios de hormigón armado

Ambas estructuras presentarían daños estructurales de nivel moderado en un escenario adverso, esto puede variar en función del estado de la estructura previo al escenario. Para ello se deben de realizar los cuidados y reparaciones correspondientes a una estructura de esta categoría.

Además, se debe analizar los costos de reparación y operación durante la contingencia, junto con evaluar el tiempo que se requiere realizar el trabajo remedial, con el fin de planificar las medidas de acción ante el escenario e identificar las zonas críticas y prioritarias de cada instalación.

9.1.3.2. Estructuras de Frente Marino

Los resultados obtenidos en las curvas de fragilidad no consideran el problema local de las estructuras con el fondo marino, el peligro de socavación y licuefacción del suelo que son, en este caso, los factores más importantes para la estabilidad del espigón ante un escenario sísmico. Las obras de mitigación de daños por socavación son realizadas constantemente por TCVAL y ayudan a mitigar de alguna forma que este factor sea crítico ante un escenario disruptivo. La mayor dificultad se presenta al no tener claridad sobre el modo de falla del suelo y la posible licuefacción que este pueda generar.

Los daños estimados con la metodología tienden a ser bajos debido a los altos costos de reconstrucción en contraposición de los costos por reparación (daño = costo de reparación/costo de reconstrucción). Debido a esto, el factor clave en la evaluación de la operatividad de la obra son los análisis de inclinación del espigón ante escenarios telúricos. La probabilidad de daño obtenida para el escenario de 1730 proporciona los antecedentes necesarios para elaborar presupuestos de contingencia, sin considerar las obras requeridas para mantener el nivel del espigón (obras de relleno de coronamiento o reconstrucción de secciones).

9.1.3.3. Grúas

Las grúas Gottwald, que están en poder de TCVAL, son dos recursos importantes y fundamentales para el negocio del puerto. Ambas pueden llegar hasta un 60% de daño en los escenarios analizados en el capítulo 7.5.2 . Las medidas de mitigación que estas instalaciones puedan tener son mínimas ya que dependen de la macroestructura del puerto y de la operación que estén realizando durante el arribo del escenario adverso.

Debido al poco control que se tiene del daño esperado, los costos y el tiempo de recuperación de la obra se recomienda considerar soluciones complementarias a la reparación que permitan la continuidad del negocio. Estas pueden ir desde el arriendo de terminales vecinos, hasta la compra de maquinaria de reemplazo.

9.1.3.4. Equipo de Oficina

El equipo de oficina es todo elemento que se pueda encontrar en las instalaciones del puerto que proporcione espacio de trabajo, control y logística. Los elementos más comunes son muebles, equipos tecnológicos (servidores, computadores, pantallas y televisores), tabiquería, paneles aisladores y zonas de uso común como cafeterías, baños, etc.

El orden en el espacio de trabajo y las herramientas necesarias para proporcionar una buena administración logística en el puerto, son los factores más importantes que resguardar al momento de analizar este tipo de instalaciones.

Debido a que los daños son por el movimiento se recomienda resguardar muebles y computadores con ganchos de apoyo que eviten cualquier caída y generen accidentes. Además, realizar copias de seguridad constantemente, análisis de riesgo operacional de los servidores y el sistema de comunicación interna con el fin de tener más antecedentes para la elaboración de estrategias de continuidad.

9.1.3.5. Equipo Eléctrico

El equipo eléctrico es toda instalación destinada a los cables y conexiones que entregan servicios eléctricos de carácter industrial (trifásico) y de uso común (monofásico). La fragilidad asociada a este tipo de instalaciones radica en el cuidado, reparación y cambio de elementos asociados a este ítem.

La importancia de estos recursos es de carácter crítico, debido a lo dependiente que es el espigón del recurso eléctrico, ya sea para alimentar los contenedores refrigerados o para alimentar las oficinas que realizan control de gestión y seguridad del espigón.

Se recomienda valorizar los costos de reparación y generar redes de trabajo con proveedores de servicios de asistencia técnica, ante el escenario disruptivo con el fin de optimizar y disminuir el tiempo de recuperación, dependiendo en menor medida, de los generadores Diesel con los que cuenta TCVAL.

9.2. Análisis de riesgo – Tsunami

9.2.1. Sobre los Antecedentes

Las experiencias de daño en contenedores y estructuras japonesas, además de los informes de puertos nacionales, son de gran utilidad para elaborar las matrices de probabilidad de daño, que es la materia primera de las curvas de fragilidad. No obstante, es necesario más información, en lo posible, proveniente de simulaciones numéricas en las que sea posible modelar el comportamiento de estas ante un escenario boyante calculando el desplazamiento y el daño de los elementos del puerto, comparando estos resultados con los antecedentes recopilados y sometiendo estos resultados a una evaluación de expertos.

9.2.2. Sobre la Metodología

Las curvas de fragilidad proporcionan el daño esperado ante un escenario disruptivo. Esto permite tomar decisiones claves para la elaboración de estrategias de continuidad.

La metodología propuesta por Koshimura, proporciona una primera aproximación probabilística, abaratando costos en modelos estructurales e hidrodinámicos, debido a que utiliza una recopilación de antecedentes y datos estadísticos de daños en diferentes zonas de Japón.

Lo anterior puede ser optimizado, utilizando antecedentes que provengan de modelos numéricos, en lo posible de los elementos flotantes, ya que estos son los que impactan sobre otras estructuras aumentando las probabilidades y niveles de daño.

Además, al igual que en el análisis por sismo, se propone categorizar las estructuras y elementos del espigón en función del uso que tienen, de igual o similar característica a lo propuesto por el ATC-13 (ver 5.1.1.2) con el fin de realizar a posterior una recopilación estadística más elaborada en adición de los antecedentes que puedan proporcionar otros puertos del país.

No obstante, se identifican las siguientes debilidades a la metodología utilizada:

- I) La socavación de material de relleno o la erosión del fondo marino no está dentro de los alcances de la metodología debido a que solo se hace estudio a los recursos e instalaciones del espigón.
- II) Necesariamente los resultados deben ser acoplados con otros estudios y antecedentes debido a las simplificaciones realizadas
- III) El daño, en algunos casos, puede ser subestimado si no se considera la velocidad del flujo y su interacción con cuerpos libres (contenedores flotantes)

9.2.3. Sobre los resultados

En general las estructuras analizadas pueden llegar presentar un daño del nivel 3 según la escala propuesta en la Tabla 3-5. Cada recurso o estructura tiene una conclusión y recomendación acorde lo obtenido en cada curva de fragilidad.

9.2.3.1. *Grúas Gottwald*

En diferentes escenarios, las grúas Gottwald no deberían presentar daños significativos debido las profundidades de arribo esperadas. Esto se debe a la disposición de la grúa, el peso que actúa como fuerza restitutiva y al equipo eléctrico que se encuentra en altura.

Las mayores complicaciones se pueden presentar posterior al escenario. Si no se realizan los cuidados y limpiezas químicas oportunas, debido a que la presencia de sales y humedad en los paneles eléctricos, maquinaria de combustible y/o las secciones hidráulicas, pueden complicar su operatividad en el mediano y largo plazo. Debido a esto, se propone generar estrategias de continuidad con los proveedores técnicos de esta área para gestionar de manera eficiente todos los cuidados mencionados, además de atacar las contingencias que puedan escapar del actual análisis.

9.2.3.2. Estructuras de hormigón

Este tipo de instalaciones se pueden encontrar en el sector de ingreso y al centro del espigón. En ambos casos comprenden estructuras de hormigón armado de dos pisos con oficinas y puntos críticos para la gestión de operación del espigón.

Los elementos de hormigón no suelen sufrir mayores daños desde un punto de vista estructural, sin embargo, si se contempla los recursos y el uso que tienen dichos espacios está situación cambia. En general los daños por inundación no suelen superar el nivel de “moderado” en la mayoría de los escenarios, concentrando la mayor preocupación en las zonas críticas dispuestas en ellos tales como:

- Instalaciones eléctricas del espigón
- Oficinas de gestión, operación y seguridad

Las oficinas, si bien requieren de limpieza y secado luego de una inundación, no supone mayores complicaciones pues estas pueden ser reemplazadas con contenedores de 20' de forma provisoria. No así en el caso de las instalaciones de redes y servidores, para ello se recomienda un análisis de riesgo operacional que evalúe los escenarios y daños esperados sobre este recurso crítico y permita elaborar planes de contingencia ante el desastre.

9.2.3.3. Instalaciones Eléctricas

A pesar de que se observan fragilidades en las instalaciones eléctricas dispuestas en el espigón, esperando daño de nivel 3 y 2, estas no alcanzan daños que signifiquen un colapso o caída del sistema completo. Esto es debido a que una vez se alcanza las profundidades críticas se asume que requieren reparaciones y cuidados especiales en las conexiones que alimentan a los contenedores refrigerados y la maquinaria del espigón.

El daño más grave que pueden sufrir este tipo de instalaciones son el impacto de elementos flotantes, siendo de las más difíciles de predecir al no contar con modelos necesarios para esto. Sin perjuicio de lo anterior, se propone la construcción de una caseta de hormigón armado donde se puede aminorar el daño por este tipo de impacto, evitando así, reparaciones complejas posterior al escenario disruptivo, concentrando el ataque de contingencias al escenario previsto en el presente estudio.

9.2.3.4. Contenedores de 20' y 40'

Los contenedores de 20' y 40' son los elementos, a lo largo del terminal, que presentan mayores complicaciones al momento de calcular los daños que puedan provocar y/o sufrir. Los resultados obtenidos en el análisis de fragilidad son en función de un análisis estático de las fuerzas que se encuentran en un escenario boyante de diferentes profundidades, es por esto, que los daños se encuentran solo en función de los costos cuando se requiere retirar, trasladar o reflotar estos materiales. Ya que, para calcular los daños que estos pueden provocar sobre otras estructuras, se requiere de modelos hidrodinámicos que contemplen el arrastre de elementos de este tipo.

De todas formas, se proponen medidas de mitigación, como la instalación de amarres de anclaje para los contenedores dispuestos para oficinas y la disposición de contenedores vacíos en sectores alejados a los puntos críticos del espigón (grúas, instalaciones eléctricas, etc.), debido a que los elementos más ligeros son los que presentan mayores

desplazamientos en escenarios boyantes. Además, la instalación portuaria debe entregar seguridad a la ciudad aledaña, por ello se propone cierre perimetral del sector de trabajo que permitan la retención de material flotante como los descritos anteriormente.

9.3. Generalidades

El presente trabajo proporciona el material básico para la elaboración de estrategias de continuidad, si bien ambos estudios (sismo y tsunami) son realizados en paralelo sin considerar el daño que uno puede causar sobre otro (Efecto Dominó), estos pueden ser utilizados como antecedente para elaborar estrategias o planes de continuidad ante diversos escenarios disruptivos.

Si bien el combinar ambos estudios presenta dificultades por el aumento de variables, es posible desarrollar un análisis de probabilidad conjunta que permita encontrar, para cierta magnitud de daño, los escenarios que puedan provocar dichos niveles. No obstante, es posible trabajar en escenarios donde existan sismos que no sean tsunamigénicos o tsunamis que sean generados fuera de la falla de la región, como por ejemplos tsunamis generados por sismos en las costas de Japón.

9.4. Recomendaciones

Para la elaboración de estrategias o planes de continuidad de mayor precisión, son necesarios mayores antecedentes y estudios que colaboren entre sí. A continuación, se describen una serie de metodologías y recomendaciones para complementar los estudios realizados con el fin de que, en futuras investigaciones, estas sean consideradas.

9.4.1. Método Delphi

En el documento ATC-13 “Earthquake damage evaluation data for California” utilizado en la presente memoria, utiliza el Método Delphi como recopilador de antecedentes estadísticos, elaborados por un panel de expertos.

El método Delphi es un proceso de comunicación grupal para trabajar un tema complejo. El grupo seleccionado debe ser un panel de expertos en el tema a trabajo, los cuales se les solicita su opinión sobre tema referido al futuro o al comportamiento de algún elemento o recurso sobre un escenario probable (Turoff, 2013). El procedimiento consta de una interrogación al panel de expertos con la ayuda de cuestionarios sucesivos y retroalimentados (el resultado de una encuesta tiene repercusión en la siguiente).

Para aplicar este método es necesario caracterizar todas las estructuras y recursos portuarios, considerando su uso y características estructurales o su materialidad. Posteriormente se debe levantar datos históricos de daños ante diferentes escenarios de sismos o tsunamis que existan sobre estas estructuras o recursos. Con esto, un panel de expertos podría entregar aproximaciones estadísticas del comportamiento estructural de los elementos consultados ante diferentes escenarios tal y como propone el documento de la ATC.

9.4.2. Fema-P695

FEMA-P695 (FEMA, 2009) propone una metodología para evaluar los factores de diseño y desempeño sísmico (R , Ω y C_d), basado en la seguridad al colapso. Estos factores son utilizados en diferentes códigos sísmicos para la estimación de la resistencia y demanda de sistemas estructuras con comportamiento no elástico (rango no lineal).

Esta metodología permite estimar la probabilidad de colapso de un sistema estructural mediante la realización de simulaciones computacionales de característica no lineal permitiendo la elaboración de curvas de fragilidad que describan de manera gráfica el daño observado durante las modelaciones.

El desarrollo de esta técnica puede llevar bastante tiempo debido a la complejidad computacional que supone. Además se estudia cada elemento como un objeto único ya que el diseño de una estructura depende de muchos factores (tipo de suelo, esfuerzos solicitantes, cargas y sobrecargas, etc) haciendo que los resultados de un estudio no tengan aplicación sobre otras estructuras con la misma tipología.

9.4.3. Análisis de elementos finitos – Software FLIP

Debido a que la debilidad de la metodología es el desconocimiento del comportamiento del suelo y su interacción con la infraestructura portuaria de la zona de estudio ante escenarios de sismos y tsunamis, es que se propone un análisis de riesgo a través de un modelo de elementos finitos llamado FLIP.

El software permite al usuario modelar un escenario en el que la estructura interactúa con el suelo en movimiento observando su comportamiento ante una falla por licuefacción. El modelo permite obtener resultados a lo largo de la infraestructura reconociendo los sectores críticos debido a la falla.

La debilidad del método de análisis es la falta de suministros necesarios para realizar un modelo sobre estructuras de gran antigüedad. En el caso del espigón (muelle opaco) no se cuenta con información de mecánica de suelos bajo la estructura, ni mucho menos planimetría de detalle sobre la composición estructural de esta, bajando la precisión esperada de un modelo como este.

9.4.4. Estudio de Erosión y socavación

Al considerar la debilidad de la metodología propuesta para el escenario de tsunamis, se propone un estudio hidrodinámico de erosión y socavación utilizando los antecedentes del escenario de 1730. Se es imperativo calcular la cantidad de material granular o de relleno pueda perder la base del espigón, además de identificar las zonas más críticas o de mayor atención.

Con ello se pueden realizar propuestas o estrategias de mitigación que propicien la retención de este material, sometido a los escenarios disruptivos mencionados a lo largo del documento.

10. Referencias

- Anagnos, T. R. (1995). *NCEER-ATC joint study on fragility of buildings*. State University of New York at Buffalo: Technical report, NCEER-95-0003. National Center for Earthquake Engineering Research.
- ATC. (1985). *ATC-13 "Earthquake Damage Evaluation Data For California"*. California.
- Barragán, e. a. (2012). Determinación de la ganitud local ml a partir de acelerogramas de movimiento fuerte. *Primer Simposio Colombiano de Sismología: Avances de la Sismología Colombiana en los últimos 20 años*, (pág. 12). Colombia. Universidad Nacional de Colombia; Colombia. Observatorio Sismológico de Quindío; Colombia. INGEOMINAS.
- British Standars Institution. (2007). *BS 25999-2:2007 Business continuity management - Requirements and guidance for use*.
- Carvajal, M. C. (2017). Source of the 1730 Chilean earthquake from historical records: Implications for the future tsunami hazard on the coast of Metropolitan Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Central Disaster Management Council. (2015). *Business continuity guideline*. Cabinet office, Government of Japan.
- Chong, W. H. (2000). *Sliding fragility of unrestrained equipment in critical facilities*. Technical report, MCEER-00-0005. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Comte, D. E. (1986). he 1985 central Chile earthquake: a repeat of previous great earthquakes in the region? *Science*, 449-453.
- Deming, W. E. (1982). *Quality, productivity, and competitive position (Vol. 183)*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Center for advanced engineering study. Obtenido de Obtenido de Balanced Scorecard Institute:: <http://www.balancedscorecard.org/thedemingcycle/tabid/112/default.aspx>.
- Ellingwood, B. R. (2001). Earthquake risk assessment of building structures. *Reliability engineering system safety*, 74, 251-262.
- EPV. (2015). Plan Maestro Puerto Valparaíso. Valparaíso.
- FEMA, P. (2009). *695. Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Federal Emergency Management Agency.
- Gumbel, E. (1960). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press.
- Gumbel, E. J. (1960). Bivariate exponential distributions. *Journal of the American Statistical Associatio*, 698-707.
- Gutenberg, B. y. (1954). *Seismicity of the earth*. N.Y: 2° edición, Princeton University Press.
- Gutenberg, B. &. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper). *Bulletin of the seismological society of America*, 105-145.
- Gutenberg, B. U. (1954). *Seismicity of the earth and related phenomena*. (NJ): Princeton .
- ISO, I. (2009). *ISO 31000:2009 Risk management-Principles and guidelines*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO, I. (2012). *ISO 22301:2012 Business continuity managemen systems-Requirements*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Kanamori, H. (1977). The energy Release in great earthquakes. *journal of Geophysical Research*, 2981-2987.
- Kious, W. J. (1996). *This dynamic Earth: The story of plate tectonics*. DIANE Publishing.
- Koshimura, S. N. (2009). Tsunami Fragility - A New Measure to Identify Tsunami Damage - . *Journalof Disaster Research*, pp. 479-488.
- Kumagai, K. (2013). *Tsunami-induced Debris of Freight Containers due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake*. Japon.
- Lavell, A. (2001). *Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición*. Scripta Nova-Revista.

- Lomnitz, C. (1966). *Statistical Prediction Review of Geophysics, Vol 4 - N°3*.
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, (10), 221.
- Martínez, J. G. (2010). *El plan de continuidad de negocio: Una guía práctica para su elaboración*. Ediciones Díaz de Santos.
- Medvedev, S. V. (1977). Seismic intensity scale MSK-76.
- Musson, R. M. (2010). The comparison of macroseismic intensity scales. *Journal of Seismology*, 413-428.
- NCh2369, I. N. N. (2003). *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- NCh3363, I. N. N. (2015). *Diseño estructural - Edificaciones en área de riesgo de inundación por tsunami o seiche*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- Oliveira, C. (1974). Seismic Risk Analysis, EERC 74-1. *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*, 1-102.
- Olivera, C. (1974). *Seismic Risk Analysis Earthquake Engineering Research*. University of California.
- Papadopoulos, G. &. (2001). A proposal for a new tsunami intensity scale. *ITS*, pp. 569-577.
- Papathoma, M. &-H. (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implication for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, p. 733-747.
- Peláez, J. A. (2011). Sobre las escalas de magnitud. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 267-275.
- PRDW. (2012). *Análisis de estabilidad y reparación sitios 6,7,8 y Muelle Prat, Puerto Valparaíso Post Sismos 27 de febrero 2010*. Valparaíso.
- PRDW. (2014). *Estudio de Estabilidad Espigón Valparaíso*. Valparaíso.
- Ramírez, J. (1986). Tsunami. *Revista Geográfica de Chile*, 29-39.
- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la lengua española (24ª. ed.)*. Obtenido de www.rae.es/rae.html
- Richter, C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1-32.
- Richter, C. F. (1958). *Elementary Seismology*. San Francisco: Better World Books.
- Rodríguez, C. P. (2011). ¿Cómo construir una matriz de riesgo operativo? *Revista de Ciencias Económicas*, 29(1).
- SATREPS Chile Working Group 4b. (2016). *BCP Guidelines for Chilean ports*. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- SATREPS-Tsunami. (2016). *Guía para la estimación de peligro de Tsunami*.
- Shinozuka, M. F. (2000). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of engineering mechanics*, 1224-1231.
- Shuto, N. (1993). Tsunami intensity and Disasters. In: *Tsunamis in the World*. s.l.:Springer Netherlands, pp. 197-216.
- Suppasri, e. a. (2012). *Building damage characteristic based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan Tsunami*. Sendai, Japan.
- Tarback, E. J. (2005). *Ciencias de la tierra*.
- TCVAL. (2016). *Simulación Tsunami Escenario 1730 - Versión sin proyecto*. Valparaíso.
- Turoff, M. H. (2013). Aranguiz, R. B. (2012). *Efectos en la bahía de concepcion de un tsunami generado en el norte de Chile*. Concepcion . Elsevier.
- UNESCO. (2013). *UNESCO-IOC. Tsunami Glossary*.
- Vargas, J. E. (2002). *Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales (Vol. 50)*. United Nations Publications.
- Virgo M. J., C. C. (2010). *Planes de contingencia y Continuidad del Negocio*. Facultad de Ciencias Económicas y Administración, Universidad de la República.

11. ANEXOS

Anexo A - Parámetro de forma, distribución Beta para cada magnitud - Sismo

Reinforced Concrete Shear Wall (With Moment-Resisting Frame)

b. Medium Rise

Facility Class 4

MMI	Low Damage Factor	Mean Damage Factor	High Damage Factor	λ	ν
6	0	0,4	1,7	0,09	23,52
7	0,7	2,3	5,6	2,75	116,74
8	3,8	7	12,8	7,30	96,95
9	7,3	12,5	22,6	8,14	56,99
10	13,4	23,3	37,1	8,26	27,21
11	20	32,7	46,7	10,60	21,81
12	31,1	46,3	61,9	12,72	14,75

Cranes

Facility Class 53

MMI	Low Damage Factor	Mean Damage Factor	High Damage Factor	λ	ν
6	0	0,4	1,8	0,11	26,24
7	0,3	1,4	3,9	1,91	134,81
8	2,3	5,5	12	4,12	70,75
9	5,5	11,7	25,2	4,64	35,00
10	13,2	25,3	40,9	6,64	19,61
11	29,3	40,6	55,4	15,98	23,38
12	41,6	53,5	71,6	17,61	15,30

Waterfront Structures

Other Structures

Facility Class 63

MMI	Low Damage Factor	Mean Damage Factor	High Damage Factor	λ	ν
6	0	0,2	1,1	0,50	249,73
7	0,1	1,7	5,2	1,01	58,37
8	3,2	7,1	13,5	5,16	67,45
9	6,9	12,6	24,7	6,56	45,50
10	14,5	25,1	40,5	7,94	23,68
11	26,4	40,2	61,7	9,25	13,76
12	50,1	53,1	86,7	241,40	213,22

Equipment
 Office
 Facility Class 65

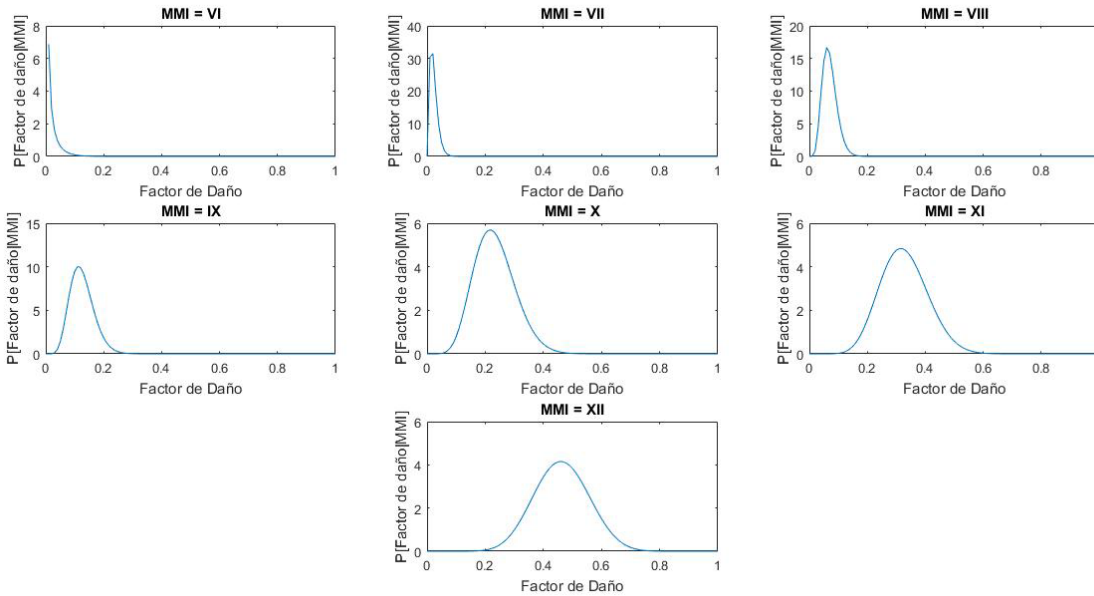
MMI	Low Damage Factor	Mean Damage Factor	High Damage Factor	λ	v
6	0,1	0,5	1,7	1,66	330,71
7	0,7	1,7	4,6	3,72	215,04
8	2,7	4,9	10,7	6,80	131,92
9	6,8	12,5	26,7	6,16	43,09
10	14,1	25,1	41,2	7,30	21,79
11	26,4	40,2	58,8	10,22	15,20
12	41,2	53,1	72,1	17,02	15,03

Equipment
 Electrical
 Facility Class 66

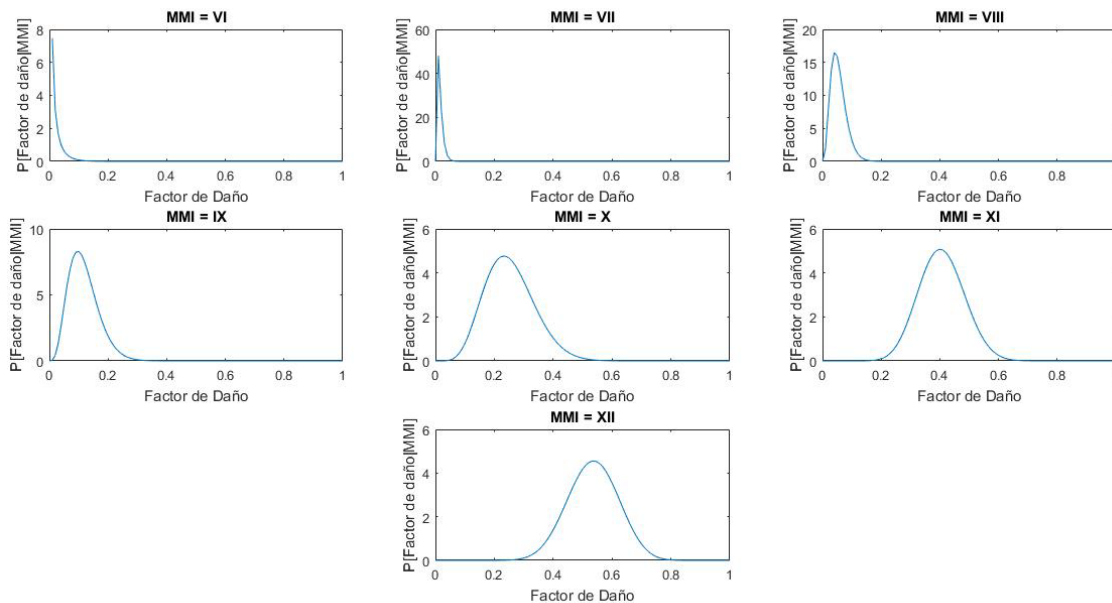
MMI	Low Damage Factor	Mean Damage Factor	High Damage Factor	λ	v
6	0,4	2,1	5,3	1,91	89,16
7	0,8	3,7	10,6	1,85	48,23
8	2	8,7	21,2	2,08	21,85
9	6,2	18,7	35,6	3,30	14,36
10	15,1	31,8	48,3	6,33	13,57
11	27,5	42,9	59,7	10,62	14,14
12	38,3	59	80,1	8,23	5,72

Anexo B - Distribución Beta de cada Instalación - Sismo

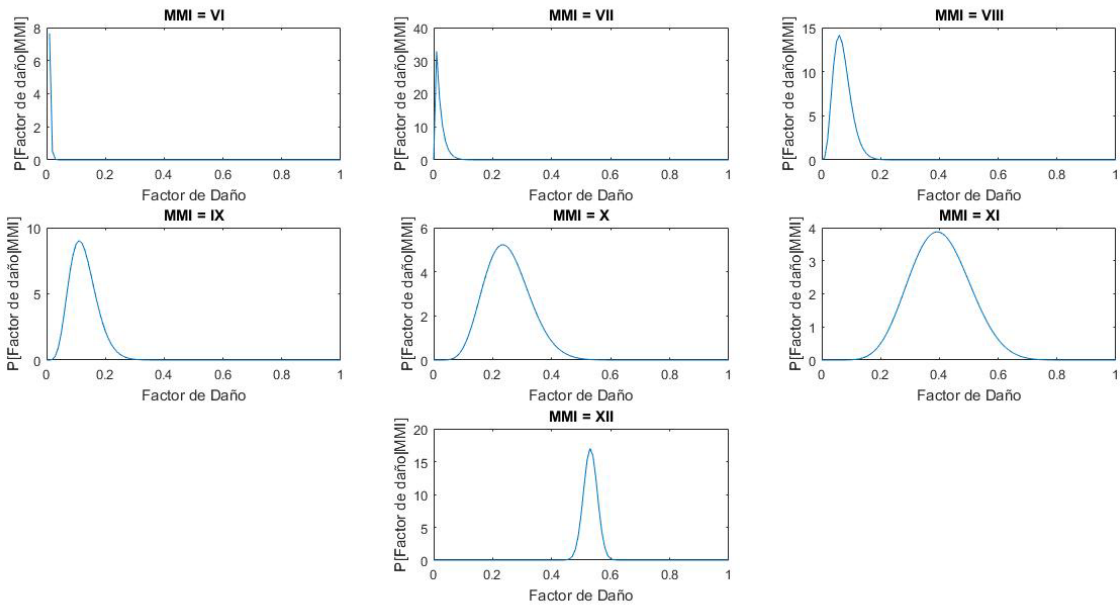
Reinforced Concrete Shear Wall (With Moment-Resisting Frame)
b. Medium Rise
Facility Class 4



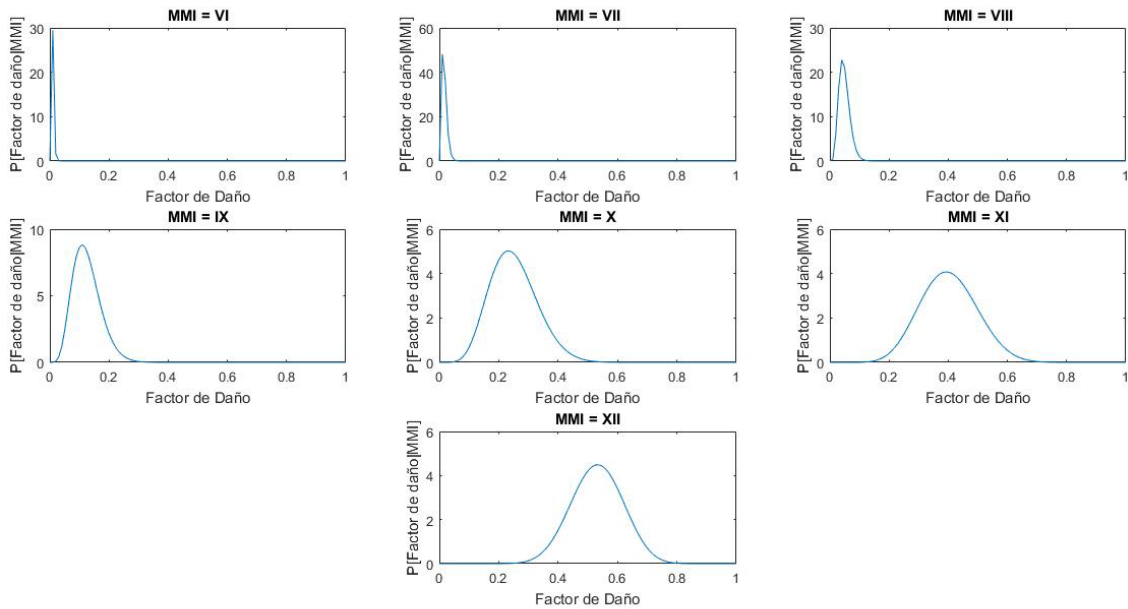
Cranes
Facility Class 53



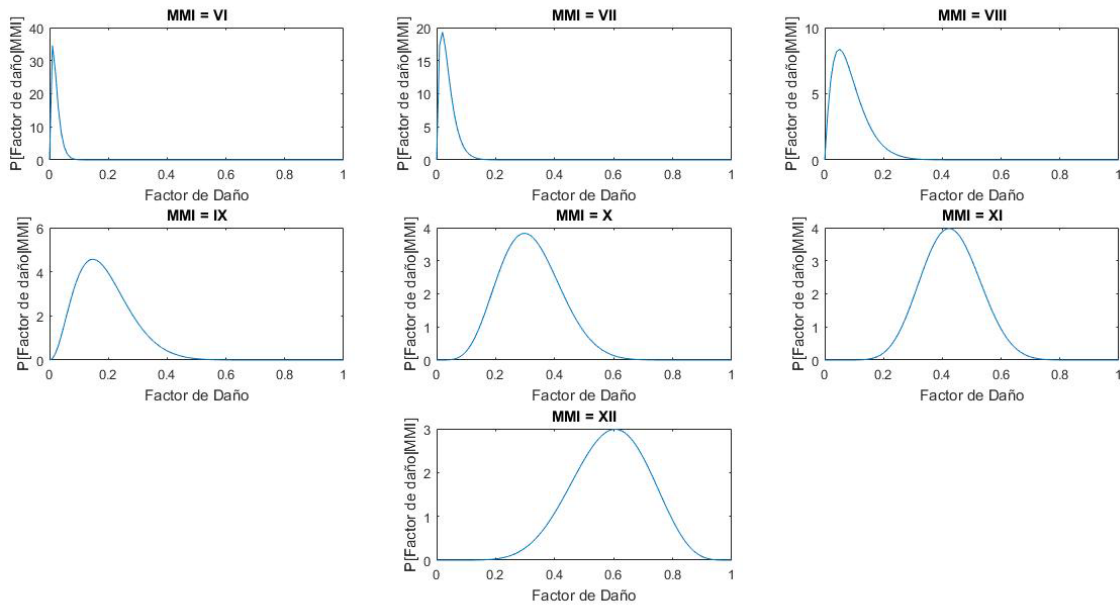
Waterfront Structures
Other Structures
Facility Class 63



Equipment
Office
Facility Class 65



Equipment
Electrical
Facility Class 66



Anexo C - Matrices de probabilidad acumulada - Sismo

Reinforced Concrete Shear Wall (With Moment-Resisting Frame)

b. Medium Rise

Facility Class 4

MMI	Damage Factor Scale					
	0.1	1	10	30	60	99
6	0,71	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00
7	0,00	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,00	0,00	0,88	1,00	1,00	1,00
9	0,00	0,00	0,29	1,00	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,01	0,83	1,00	1,00
11	0,00	0,00	0,00	0,39	1,00	1,00
12	0,00	0,00	0,00	0,04	0,93	1,00

Cranes

Facility Class 53

MMI	Damage Factor Scale					
	0.1	1	10	30	60	99
6	0,70	0,88	0,98	1,00	1,00	1,00
7	0,01	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,00	0,01	0,94	1,00	1,00	1,00
9	0,00	0,00	0,41	1,00	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,02	0,73	1,00	1,00
11	0,00	0,00	0,00	0,08	0,99	1,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	1,00

Waterfront Structures

Other Structures

Facility Class 63

MMI	Damage Factor Scale					
	0.1	1	10	30	60	99
6	0,52	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00
7	0,05	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,00	0,00	0,84	1,00	1,00	1,00
9	0,00	0,00	0,31	1,00	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,01	0,75	1,00	1,00
11	0,00	0,00	0,00	0,16	0,97	1,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00

Equipment
 Office
 Facility Class 65

MMI	Damage Factor Scale					
	0.1	1	10	30	60	99
6	0,09	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
7	0,00	0,22	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,00	0,00	0,99	1,00	1,00	1,00
9	0,00	0,00	0,33	1,00	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,01	0,74	1,00	1,00
11	0,00	0,00	0,00	0,15	0,98	1,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,78	1,00

Equipment
 Electrical
 Facility Class 66

MMI	Damage Factor Scale					
	0.1	1	10	30	60	99
6	0,01	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00
7	0,00	0,11	0,97	1,00	1,00	1,00
8	0,00	0,02	0,66	1,00	1,00	1,00
9	0,00	0,00	0,17	0,88	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,01	0,45	0,99	1,00
11	0,00	0,00	0,00	0,09	0,96	1,00
12	0,00	0,00	0,00	0,01	0,52	1,00

Anexo D - Matrices de probabilidad acumulada - Tsunami

Grúa Gottwald
 GHMK-6407

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,9	0,6	0,3	0
2	1	1	0,9	0,8	0,5
3	1	1	1	1	0,8
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Oficinas Contenedor 20'
 Single Stack - Carga Ligera

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	0,9	0,3	0	0	0
2	1	0,9	0,2	0	0
3	1	1	0,8	0,2	0
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Contenedor 40'
 Single Stack - Vacía

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,6	0	0	0
2	1	1	0,6	0	0
3	1	1	1	0,8	0
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Contenedor 40'
 Single Stack - Con Carga

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,9	0	0	0
2	1	1	0,8	0	0
3	1	1	1	0,8	0,2
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Contenedor 40'
 double stack - Vacío

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,7	0	0	0
2	1	1	0,5	0	0
3	1	1	1	0,6	0
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Contenedor 40'
 double stack - Con Carga

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	1	0,6	0	0
2	1	1	1	0,5	0
3	1	1	1	1	0,5
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Panel Electrico
 Cafetería

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	0,8	0,2	0	0	0
2	1	0,9	0,8	0,1	0
3	1	1	1	0,9	0,6
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Panel Electrico
 Sitio 8

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	0,8	0,2	0	0	0
2	1	0,9	0,5	0	0
3	1	1	1	0,7	0,5
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Oficinas
 Zona de Ingreso

Damage Level	Profundidad[mNRS]				
	4,2	4,5	5	5,5	6
1	1	0,9	0,5	0,3	0
2	1	1	0,9	0,8	0,6
3	1	1	1	1	0,9
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1