



**Memoria de titulación para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico**

**ANÁLISIS DE RIESGOS INFRAESTRUCTURALES EN EL
PUERTO DE IQUIQUE ANTE EVENTOS DE TERREMOTO Y
TSUNAMI.**

Marco Esteban Saravia Contreras

Enero 2018

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“ANÁLISIS DE RIESGOS INFRAESTRUCTURALES EN EL PUERTO DE IQUIQUE
ANTE EVENTOS DE TERREMOTO Y TSUNAMI.”**

Marco Esteban Saravia Contreras

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Sr. Mauricio Reyes G. Profesor guía	_____	_____
Sr. Felipe Caselli B. Revisor	_____	_____
Sr. Raúl Oberreuter O. Revisor	_____	_____

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO,
VALPARAÍSO, CHILE
2018

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados 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.

Nombre y firma profesor guía

Nombre y firma alumno

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su gracia inmerecida y a quien he ido descubriendo cada vez más a lo largo de mi vida, entendiendo que nada es producto del azar, sino de su perfecta voluntad.

A mis padres por su amor, paciencia y apoyo incondicional.

A mis hermanos por siempre estar presentes y aconsejarme.

A mis amigos, en especial a... José Luis, Francisco, Luis, Pablo, Franco y Fabián por ser parte de todo este proceso y de lo que vendrá.

A profesores y excelentes profesionales conocidos a lo largo de todo este camino, especialmente a Raúl Oberreuter, Felipe Caselli, Patricio Winckler, Ariel Grandón, José Beyá y mi profesor guía Mauricio Reyes por sus consejos, críticas y por transmitir vida más allá de lo académico.

A todos los que de una u otra forma se hicieron presente en actos sencillos, detalles del día a día, que se vuelven trascendentales en parte de todo este proceso.

A Dios ...Porque de él, y por él, y para él, son todas las cosas.

CONTENIDOS

1.	12
2.	17
2.1.	17
2.2.	17
2.3.	17
3.	19
3.1.	21
3.1.1.	23
3.1.2.	25
3.1.3.	26
3.1.4.	28
3.2.	30
3.3.	32
3.3.1.	32
3.3.2.	40
3.4.	46
3.4.1.	48
3.5.	49
4.	53
5.	57
5.1.	63
5.1.1.	64
5.1.2.	65
5.1.3.	66
5.1.4.	66
5.1.5.	67
5.2.	67
6.	69
6.1.	73
6.1.1.	73
6.1.2.	73
6.2.	75
6.2.1.	75
6.3.	78
6.3.1.	78
6.3.2.	82
7.	84
7.1.	87
7.2.	88
7.3.	89

7.3.1.	89
7.3.2.	91

8. 92

ANEXO A. 96

I.	96
a.	96
b.	96
c.	96
d.	97

ANEXO B. 98

I.	98
II.	99
III.	99
IV.	100

ANEXO C. 102

I.	102
II.	104
III.	104
IV.	106
V.	106

ANEXO D. 114

I.	114
a.	114
b.	121
c.	131
II.	133
a.	133
b.	135
c.	136
III.	141
a.	142
b.	144

ANEXO E. 150

I.	150
II.	151

ANEXO F. 153

I.	159
II.	167
a.	167
b.	169
c.	170

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Velocidad de convergencia, placas Nazca y Sudamericana.	13
Figura 1.2: Zona de ruptura y registro de acelerómetros durante el sismo del 27F.	13
Figura 1.3: Bahía de Talcahuano.	14
Figura 1.4: Puerto de Talcahuano post terremoto (06 de marzo de 2010).	15
Figura 1.5: Daños en Puerto Talcahuano.	15
Figura 3.1: Distribución espacial de la licuefacción observada.	20
Figura 3.2: Curvas de fragilidad para daño leve, moderado, severo y total.	30
Figura 3.3: Gestión de continuidad del negocio.	31
Figura 3.4: Fuentes sismogénicas.	33
Figura 3.5: Terremoto de Iquique 1877.	36
Figura 3.6: Atenuación y efectos en el suelo local.	37
Figura 3.7: Zonificación de Chile por tipo de suelo.	39
Figura 3.8: Generación de tsunamis por terremoto submarino.	40
Figura 3.9: Amplitud de tsunamis, altura de run-up y factor de run-up.	41
Figura 3.10: Cinturón de Fuego del Pacífico (línea roja).	41
Figura 3.11: Condiciones resonantes de la Bahía de Concepción.	43
Figura 3.12: Cargas características en un muelle.	49
Figura 3.13: Puertos de uso público.	50
Figura 3.14: Puertos de uso privado.	51
Figura 3.15: a) Estructura tipo abierta; b) Estructura tipo cerrada.	52
Figura 3.16: Tipos de muelle: a) Muelle marginal; b) Muelle perpendicular.	52
Figura 4.1: Esquema de metodología utilizada.	54
Figura 5.1: Tasas de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana.	58
Figura 5.2: Puertos analizados de la octava región.	59
Figura 5.3: Mediciones de runup y profundidad de flujo.	62
Figura 5.4: Compresión de zona del muelle	65
Figura 5.5: (a) Perfil de pilotes sector Puente de Acceso y Cabezo. (b) Torsión natural.	66
Figura 5.6: (a) Esquema general de falla en muro de contención.	67
Figura 5.7: Gráfico de recuperación portuaria octava región.	68
Figura 6.1: Plano topográfico de Iquique, 1861.	69
Figura 6.2: Plano del Puerto de Iquique 1928.	70
Figura 6.3: Corte transversal del molo de unión con Isla Serrano.	71
Figura 6.4: Molo de abrigo Puerto de Iquique.	71
Figura 6.5: Perfil parte extrema del molo.	72
Figura 6.6: Puerto de Iquique.	73
Figura 6.7: Plano de licitaciones Puerto de Iquique.	74
Figura 6.8: Infraestructura Puerto de Iquique.	75
Figura 6.9: Vista transversal Molo de Abrigo.	76
Figura 6.10: Vista transversal de la infraestructura del Espigón.	77
Figura 6.11: Vista transversal del Sitio 4 luego de ampliación en 2005.	77
Figura 6.12: Grietas en las explanadas del Molo de Abrigo (EPI).	79
Figura 6.13: Grieta en muro exterior (extremo del Molo de Abrigo).	80
Figura 6.14: Ejemplo de aberturas en bloques de hormigón del Molo de Abrigo (EPI).	81
Figura 6.15: Daños en sitios 3 sector Espigón (ITI).	82
Figura 6.16: Sectorización de daños del Molo de Abrigo (EPI).	82

Figura C.1: Zonificación Sísmica del Territorio Nacional (NCh433 Of.93). ¡Error! Marcador no definido.	
Figura C.2: Zonificación sísmica octava región.	105
Figura C.3: Zonificación sísmica Iquique.	105
Figura C.4: Curvas de igual intensidad (isositas) asociadas al terremoto de Arica 1868.	108
Figura C.5: Curvas de igual intensidad (isositas)	109
Figura C.6: Sismos significativos y zonas de ruptura al norte de Chile y sur de Perú	110
Figura C.7: Sismicidad durante un mes de duración, asociada a los terremotos del sur de Perú (2001), Iquique (2014), Tocopilla (2007) y Antofagasta (1995).	111
Figura C.8: Diagrama espacio temporal de los sismos fuertes en Chile continental.	112
Figura D.1: Puerto Lirquén. Muelle 1 (Lirquén Este), Muelle 2 (Lirquén Oeste).	114
Figura D.2: Daños típicos en sección transversal.	115
Figura D.3: Asentamiento Muelle 1.	116
Figura D.4: Falla en el sistema de amarre del Muelle 1.	116
Figura D.5: Fotografía de pilotes Muelle 1.	117
Figura D.6: Daños típicos en vigas longitudinales inferiores, Muelle 1.	118
Figura D.7: Daños típicos en vigas transversales, Muelle 1.	118
Figura D.8: Daño en la conexión viga-pilote del Muelle 1.	119
Figura D.9: Daño en la conexión de uno de los ejes del Muelle 1.	119
Figura D.10: Daño en la conexión viga-pilote del Muelle 1.	120
Figura D.11: Muelle de Penco.	121
Figura D.12: Fotografías del Puente de Acceso, Muelle Penco.	122
Figura D.13: Vista general del cabezo.	123
Figura D.14: Representación de la socavación en las zapatas de pilotes.	124
Figura D.15: Pilote con fisura y pandeo local.	125
Figura D.16: Pilote con fisura bajo la camisa de hormigón.	125
Figura D.17: Descenso en cepas, Muelle Penco.	126
Figura D.18: Viga castella desplazada en Puente de Acceso.	126
Figura D.19: Ejemplo de riostras cortadas en cepas del Puente de Acceso.	127
Figura D.20: Viga travesaño desoldada y desplazada	127
Figura D.21: Camisa de pilotes agrietadas y desprendidas en el cabezo.	128
Figura D.22: Pilotes desoldados y desplazados en el cabezo.	128
Figura D.23: Pilotes desoldados y desplazados del jacket.	129
Figura D.24: Puerto de Talcahuano.	130
Figura D.25: Daños en Puerto de Talcahuano post 27F.	131
Figura D.26: Vista aérea de daños en Puerto de Talcahuano.	131
Figura D.27: Ubicación Puerto San Vicente Terminal Internacional.	133
Figura D.28: Ubicación Muelle ENAP.	134
Figura D.29: Muelle ENAP:	135
Figura D.30: Ubicación Muelle CAP Huachipato.	136
Figura D.31: Falla por corte en unión viga-pilote.	137
Figura D.32: Grieta en la loza del muelle (sector del puente de acceso).	137
Figura D.33: TD1	138
Figura D.34: Bogies descarrilados.	139
Figura D.35: a) Pluma de carga principal; b) Grúa inclinada	139
Figura D.36: Ubicación Bahía de Coronel.	140
Figura D.37: Ubicación Empresa Portuaria Cabo Froward.	141
Figura D.38: Inclinación en sistema de fundación del Muelle Jureles	143
Figura D.39: Ubicación Puerto de Coronel.	144

Figura D.40: Ubicación de aisladores sísmicos del M. Coronel Sur.	145
Figura D.41: Grietas en el pavimento de zona de acopio.	146
Figura D.42: Conexión viga-pilote en muelles Coronel Norte y Sur.	147
Figura D.43: Desplazamiento relativo medido entre el Cabezo aislado sísmicamente y el Puente de Acceso no aislado del Muelle Coronel Sur.	147
Figura D.44: Desplome de pilas de containers en sector de acopio, Puerto Coronel.	147
Figura D.45: Asentamiento y fisuras en el terreno de la zona de acopio	148
Figura D.46: Agujeros en el pavimento de la zona de acopio.	148
Figura E.1: Representación esquemática del desplazamiento lateral	150
Figura E.2: Efecto del desplazamiento lateral sobre pilotes.	151
Figura E.3: Licuación y desplazamiento lateral de explanada en Puerto de Talcahuano	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Los 10 principales desastres naturales en Chile del siglo XX y el megaterremoto de 2010, según daños económicos.	22
Tabla 3.2: Organización secuencial del ciclo de desastres.	24
Tabla 3.3: Esquematación del concepto de gestión riesgo. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3.4: Estado de daño según ATC-13.	29
Tabla 3.5: Escala de intensidad EMS-98.	35
Tabla 3.6: Escala de grados de tsunami según Inamura.	44
Tabla 3.7: Escala de grados de tsunami según lida.	44
Tabla 3.8: Escala de grados de tsunami según Inamura e lida, transcrita por Wiegel.	45
Tabla 3.9: Escala de intensidad de tsunamis propuesta por Soloviev.	45
Tabla 3.10: Diferentes métodos de calificación para caracterización de daño.	48
Tabla 5.1: Infraestructura general de los puertos analizados de la octava región.	60
Tabla 5.2: Registro de 'run-ups' e inundaciones en la octava región	61
Tabla 5.3: Resumen de daños más comunes registrados.	64
Tabla 5.4: Recuperación de los sitios de ataque por puerto, octava región.	68
Tabla 6.1: Clasificación de daños en molo de abrigo (EPI) del Puerto de Iquique.	83
Tabla 7.1: Matriz de riesgo en infraestructura portuaria. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 7.2: Matriz de impacto aplicada a los puertos de la octava región.	87
Tabla 7.3: Matriz de impacto aplicada al Puerto de Iquique.	88
Tabla 7.4: Matriz de impacto ante Escenario 1 aplicada al Puerto de Iquique.	90
Tabla 7.5: Matriz de impacto ante Escenario 2 aplicada al Puerto de Iquique.	91
Tabla F.1: Matriz de riesgo BHP. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla F.2: Matriz de riegos ENAP.	154
Tabla F.3: Matriz de riesgos SERNAGEOMIN.	155
Tabla F.4: Matriz infraestructura vs daños, parte 1. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla F.5: Matriz infraestructura vs daños, parte 2. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla F.6: Matriz infraestructura vs daños, parte 3. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla F.7: Matriz infraestructura vs daños, parte 4. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla F.8: Matriz infraestructura vs daños, parte 5. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla F.9: Costos asociados a las reparaciones de los puertos de la octava región ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla F.10: Infraestructura vs Daño Puerto de Iquique, evento 1° abril de 2014.	164
Tabla F.11: Infraestructura vs Daño Puerto de Iquique, Escenario 1.	165

RESUMEN

Actualmente es necesario contar con planes de continuidad de negocios (BCP, por su sigla en inglés) ante escenarios de desastre, siendo fundamental evaluar el nivel de riesgo ante un evento, como terremoto, tsunami o la combinación de ambos.

En el marco del proyecto JICA-Satreps “Research Project on Enhancement of Technology to Develop Tsunami-Resilient Community”, la metodología de BCP, ha sido aplicada en el Puerto de Iquique. Para ello, se analizaron los puertos estatales y privados del Gran Concepción en el evento sismo tsunamigénico del 27 de febrero del 2010, sumado a los daños observados durante el terremoto de Iquique, ocurrido el primero de abril de 2014. Para esto, fue necesario realizar una caracterización infraestructural de los puertos de la octava región y del Puerto de Iquique, basándose en una recopilación, clasificación y codificación de la información oficial dentro de la Dirección de Obras Portuarias, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile y también del uso de información no oficial, relativa a puertos privados, para el posterior desarrollo de resúmenes esquemáticos de la infraestructura analizada.

El proyecto presenta un análisis de riesgo para la infraestructura del Puerto de Iquique, basado empíricamente en los daños registrados en la infraestructura de los puertos de la Octava Región del Biobío, como consecuencia del evento del 27 de febrero de 2010. Realizándose una descripción detallada de la infraestructura, descripción y evaluación de daños para la posterior elaboración de una matriz de daño infraestructural para el Puerto de Iquique, ante hipotéticos escenarios de riesgo, discutidos y adoptados, ante la posibilidad de un evento sismo tsunamigénico.