



Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**“EVALUACIÓN DE LA FRAGILIDAD DE LOS RECURSOS
OPERACIONALES DEL PUERTO DE IQUIQUE, SITIOS 3 Y 4”**

HERNÁN FELIPE BONONATO SILVA

DICIEMBRE 2017

**“EVALUACIÓN DE LA FRAGILIDAD DE LOS RECURSOS OPERACIONALES DEL
PUERTO DE IQUIQUE, SITIOS 3 Y 4”**

HERNÁN FELIPE BONONATO SILVA

COMISIÓN REVISORA

CALIFICACIONES

Nota

Firma

PROFESOR GUÍA

SR. FELIPE CASELLI B.

PROFESOR REVISOR 2

SR. MAURICIO REYES G.

PROFESOR REVISOR 3

SR. JAIME SERRANO C.

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.

Felipe Caselli
Profesor Guía

Hernán Bononato
Alumno Memorista

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Valparaíso por impartir una gran carrera como lo es Ingeniería Civil Oceánica, por contar con excelentes académicos y funcionarios que son fundamental en la formación de profesionales y grandes personas.

La materialización de este proyecto estuvo al mando del profesor guía, Sr. Felipe Caselli B. quien en todo momento fue un apoyo fundamental para culminar esta etapa de la vida. Además, a la comisión revisora Sr. Mauricio Reyes y Sr. Jaime Serrano, quienes con sus consejos y conocimientos ayudaron a concretar este proyecto de título.

Durante los años que recorrí las aulas de la UV tuve la fortuna de conocer compañeros que pasaron a ser grandes amigos de la vida, como Francisca, Gustavo, Alex, Richard, Ivette, JuanPablo, Cindy, Miguel y Sebastián, así también a mis amigos de la vida, quienes me guiaron a tomar la decisión correcta de aspirar a la universidad, Diego, Gabriel, Eduardo, Mario, Rubén y Víctor.

Quisiera agradecer a todos quienes participaron de las actividades que realizamos en conjunto con ANEIC, que me dio la oportunidad de recorrer las diferentes universidades, realizar congresos y directivas que marcaron un punto de inflexión en mi vida. Mención especial al Dr. Patricio Winckler G. que nos dio la primera oportunidad de representar nuestra carrera en ANEIC en la ciudad de Concepción, donde conocí a grandes profesionales y amigos, Ignacio, Felipe, Berny, Diego y Fernando.

Agradezco a los académicos que me nutrieron de conocimientos, a todos los funcionarios que son fundamental en la actividad universitaria, en especial a Marjorie y Yasna quienes siempre estuvieron disponibles para solucionar cualquiera sea el problema, Muchas Gracias.

A mi madre Gilda, quien, a pesar de tener una ardua labor como madre y padre, siempre me entrego un apoyo irrestricto, a mis hermanos Dante, Angelo, Fernando e Italo. A mis abuelos Rufino y Alicia, a Lizieth, tíos y primos.

A todos que de alguna forma aportaron a este proyecto, muchas gracias.

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	2
2	OBJETIVOS	4
2.1	OBJETIVO GENERAL:	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	4
3	MARCO TEORICO	5
3.1	PLAN DE CONTINUIDAD DE NEGOCIOS (BCP).....	6
3.2	ANALISIS DE RIESGO	8
3.2.1	CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA.....	9
3.2.2	CARACTERIZACION DE LA VULNERABILIDAD	11
3.3	TERREMOTO	12
3.3.1	MECANISMOS DE GENERACIÓN.....	14
3.3.2	TIPOS DE SISMOS INTERPLACA	16
3.3.3	ACTIVIDAD SÍSMICA EN IQUIQUE.....	17
3.4	LICUEFACCIÓN	19
3.5	TSUNAMI.....	22
3.6	MÉTODO DELPHI	24
4	SITUACIÓN ACTUAL	25
4.1	CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	30
4.1.1	SITIO 3	32
4.1.2	SITIO 4	34
4.2	EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS POR TERREMOTO	36
5	METODOLOGÍA	38
5.1	DEFINICIÓN ESCENARIO DE DESASTRE.....	38
5.2	APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI	39
5.2.1	PANEL DE EXPERTOS	39
5.2.2	ENCUESTA	40
5.3	RECOPIACIÓN DE DAÑOS EN PUERTOS POR TERREMOTO.....	40
6	RESULTADOS	42
6.1	MÉTODO DELPHI	42
6.1.1	SITIO 3	42

6.1.2	SITIO 4	43
6.1.3	EFFECTOS DE LICUEFACCIÓN.....	45
6.1.4	EFFECTOS DEL TSUNAMI	45
6.2	ANÁLISIS DE DAÑOS REGISTRADOS EN ESTRUCTURAS PORTUARIAS.	45
6.3	PLAN DE CONTINUIDAD DE NEGOCIOS	49
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
8	REFERENCIAS	53
9	ANEXOS.....	55
9.1	ANEXO CARTA DE INUNDACION DE IQUIQUE	55
9.2	ANEXO PANEL DE EXPERTOS.....	56
9.3	ANEXO ESTIMACION DE DAÑOS.....	57
9.4	ANEXO INFORME DELPHI 1	58
9.5	ANEXO INFORME DELPHI 2.	66
9.6	ANEXO INFORME DELPHI 3	70
9.7	ANEXO RECOPIACION DE ANTECEDENTES	71

ÍNDICE DE IMÁGENES

FIGURA 1-1, LAYOUT DEL PUERTO DE IQUIQUE	3
FIGURA 3-1, MAPA CONCEPTUAL DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	5
FIGURA 3-2, GRAFICO COMPARATIVO DE UN PLAN DE ACCIÓN DE UNA ORGANIZACIÓN CON Y SIN BCP.	6
FIGURA 3-3, PROCEDIMIENTOS PARA UN BCP DE PUERTOS	7
FIGURA 3-4, RELACIÓN RIESGO-AMENAZA-VULNERABILIDAD, COMO CONCEPTO VARIABLE Y FIJO.	8
FIGURA 3-5, ESPECTROS DE PSEUDO ACELERACIONES Y PROPUESTA.	10
FIGURA 3-6, MODO DE FALLO EN MUELLES DE BLOQUES DE HORMIGÓN.	11
FIGURA 3-7, MODOS DE FALLO GEOTÉCNICO EN MUELLES DE PILOTES.....	11
FIGURA 3-8, ESCALA DE RICHTER.	13
FIGURA 3-9, PRIMERA ZONA DE CONTACTO INTER PLACA.	14
FIGURA 3-10, DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DE CONVERGENCIA DE LA PLACA DE NAZCA BAJO LA SUDAMERICANA	15
FIGURA 3-11, ZONA DE SUBDUCCIÓN PLACA DE NAZCA/SUDAMERICANA, TIPOS DE SISMOS.	16
FIGURA 3-12, LAGUNA SÍSMICA EN EL NORTE DE CHILE.	17
FIGURA 3-13, LÍNEA DE TIEMPO DE TERREMOTOS HISTÓRICOS CON LARGOS ESTIMADOS DE RUPTURA.	18
FIGURA 3-14, DAÑOS POR LA LICUEFACCIÓN DE SUELOS DURANTE EL TERREMOTO DE NIIGATA, JAPÓN 1964	19
FIGURA 3-15, DAÑOS EN EL PUERTO DE KOBE 1995	20
FIGURA 3-16, EFECTOS DE LA LICUEFACCIÓN EN EL PUERTO DE CORONEL.....	21
FIGURA 3-17, TIPOS DE FALLA POR LATERAL SPREADING	21
FIGURA 3-18, GENERACIÓN DE UN TSUNAMI POR UN SISMO.	22
FIGURA 3-19, PROPAGACIÓN DEL TSUNAMI GENERADO POR EL TERREMOTO DE JAPÓN 2011.	23
FIGURA 4-1, UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE IQUIQUE.	25
FIGURA 4-2, ÁREA DE ESTUDIO.	26
FIGURA 4-3, GRÚA REACH STACKER	28
FIGURA 4-4, GRÚA GOTTWALD HMK280	28
FIGURA 4-5, REGISTRO DEL ACELEROGRAMA PSGCS, CORRESPONDIENTE AL TERREMOTO DEL 2-04-2014.	29
FIGURA 4-6, MAPA DE ACOPLAMIENTO.....	30
FIGURA 4-7, UBICACIÓN GENERAL ESPIGÓN Y LOS FRENTES DE ATRAQUE, CORRESPONDIENTES A SITIOS 3, 4 Y EXTENSIÓN SITIO 4.....	31
FIGURA 4-8, CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL SITIO 3.....	32
FIGURA 4-9, MODELO PARA ANALIZAR EL REFUERZO CON TENSORES.	33
FIGURA 4-10, SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA EXTENSIÓN DEL SITIO 4.	34
FIGURA 4-11, SECCIÓN TIPO REFERENTE A LA EXTENSIÓN DEL SITIO 4.	35
FIGURA 4-12, DAÑOS EN SITIOS 3-4 CORRESPONDIENTE A ITI.	36
FIGURA 4-13, DAÑO POR SOCAVACIÓN DE LA EXPLANADA A LO LARGO DEL FRENTES DE ATRAQUE DEL SITIO 3.	37
FIGURA 4-14, DAÑO EN EL CABEZO DEL ESPIGÓN POR SOCAVACIÓN.	37
FIGURA 6-1, RESUMEN DE DAÑOS DEL MOLO DE ABRIGO, PUERTO DE IQUIQUE.	46
FIGURA 6-2, DAÑOS EN EL PUERTO DE TALCAHUANO	47
FIGURA 6-3, ESPECTRO DE DEMANDA SÍSMICA UTILIZADO PARA EL DISEÑO DE LA EXTENSIÓN DEL SITIO 4 FUENTE: (PRDW ALDUNATE VÁSQUEZ, 2008)	48
FIGURA 6-4, DAÑOS EN PUERTO DE CORONEL.....	49
FIGURA 9-1, EXTRACTO DE CARTA DE INUNDACIÓN.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3-1, TABLA DE GRADUACIÓN DE DAÑOS	12
TABLA 4-1, DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS DE ATRAQUE.....	27
TABLA 4-2, EQUIPAMIENTO PARA EL MANEJO DE CARGA DEL TERMINAL ITI	27
TABLA 4-3, BARCOS DE DISEÑO PARA EL SITIO 4	27
TABLA 5-1, ANTECEDENTES SÍSMICOS DE IQUIQUE.	38
TABLA 5-2, ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS SÍSMICOS DEL EVENTO DE 1877	39
TABLA 5-3, TABLA DE GRADUACIÓN DE DAÑOS	40
TABLA 6-1, DISTRIBUCIÓN DE DATOS, SEGÚN RESPUESTA DE EXPERTO PARA EL SITIO 3	42
TABLA 6-2, COMPORTAMIENTO PORCENTUAL ESTIMADO POR LOS EXPERTOS PARA EL SITIO 4	44
TABLA 6-3, FRAGILIDAD DE LOS RECURSOS	50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 6-1, COMPORTAMIENTO PORCENTUAL ESTIMADO POR LOS EXPERTOS PARA EL SITIO 3.....	43
GRÁFICO 6-2, COMPORTAMIENTO PORCENTUAL ESTIMADO POR LOS EXPERTOS PARA EL SITIO 4.	44

RESUMEN

Iquique es una ciudad-puerto, zona franca y comuna capital de la Provincia de Iquique y de la región de Tarapacá, tiene una población de 278.251 habitantes, según el censo del 2012, es conocida en la región por el intercambio comercial que tiene el puerto, que a través de la denominación de zona franca, hacen de esta ciudad un atractivo polo de desarrollo para las naciones vecinas y una fuente laboral importantes para sus ciudadanos.

Entre los años 2012 y 2016 se desarrolló un proyecto entre Chile y Japón para el mejoramiento tecnológico para el desarrollo de comunidades resilientes, el que tiene dentro de sus objetivos el desarrollo de un plan de continuidad de negocio (BCP¹) para el puerto de Iquique.

El desarrollo de esta investigación tiene como propósito entregar una metodología que permita analizar el riesgo de daños en el puerto de Iquique ante un escenario de terremoto de las características del ocurrido el 9 de Julio de 1877, de magnitud $M_s = 8.8$. Para la estimación de daños se utilizó el procedimiento Delphi, cuyos resultados son usados como insumos en la elaboración de un BCP.

El nivel de daño y el tipo de falla estimado para el sitio 3 y 4 se determinó mediante la aplicación del método Delphi, que consulta a un conjunto de expertos el nivel de daño esperado respecto del terremoto determinado, según la tipología estructural. Esta información fue comparada a con la recopilada en los daños registrados producto del impacto que tuvo el terremoto del año 2010 en los puertos de la octava región y el generado en Iquique por el terremoto del año 2014. Daños como el asentamiento de la superficie, socavación, pérdida de la estabilidad que generó en algunos casos el colapso del frente de ataque, como el observado en el puerto de Iquique, terminal 1.

La estimación de los daños permite entregar mecanismos de posible falla y a su vez sirven para plantear posibles medidas que permitan disminuir la vulnerabilidad estructural, mediante un proceso de retroalimentación que se genera con el trabajo en conjunto de las partes directamente involucradas y, de esta manera generar recomendaciones para la continuidad de las operaciones (BCP)

¹ BCP: Business continuity plan

1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Iquique está ubicada en la zona norte de Chile, la conectividad es un punto fundamental para una ciudad costera, ya que existen largos tramos de carretera que atraviesan el desierto (Ruta 5, Ruta A-1, Ruta A-5), es por este motivo que algunos investigadores consideran que la ruta puede ser muy frágil en caso de terremotos (Caselli et. al., 2014).

La ciudad cuenta con el aeropuerto Internacional “Diego Aracena”, una terminal que está ubicada a 45 km de la ciudad, así como el acceso marítimo, por intermedio del Puerto de Iquique. Por intermedio de estas vías es posible comunicar la ciudad con el resto del país y el mundo, para el continuo desarrollo económico-social-cultural de la localidad, así como en el apoyo logístico ante el caso de una catástrofe natural.

En referencia al último ítem de conexión, los puertos son un punto estratégico para las ciudades costeras, así como para el desarrollo de la economía local y nacional.

Debido a los últimos eventos naturales relacionados con terremotos y tsunamis, que causaron una catástrofe a las ciudades y asentamientos costeros, se han encendido las alarmas de la comunidad científica, política y social, para buscar mecanismos que puedan disminuir la tasa de mortalidad e impacto en la infraestructura esencial para el control y manejo de este tipo de eventos.

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo (CSN, s/f), un ejemplo es el ocurrido en la ciudad de Valdivia el año 1960 ($M_w = 9.6$), el terremoto más grande desde que se tiene registro, (Lomnitz C. , 2004), debido a su magnitud tuvo una ruptura de aproximadamente 1.000 km, que afectó a lo largo de la costa del país, este terremoto causó más de 3.000 víctimas fatales en Chile y daños cuantiosos en la infraestructura nacional.

Este terremoto también generó un tsunami de tal magnitud que atravesó todo el océano Pacífico. 15 horas después del terremoto un tren de olas de 10 metros golpeó las costas de Hawái, causando la muerte de 61 personas. Eventos similares se registraron en las costas de Japón, Filipinas, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Samoa y las islas Marquesas (CSN, s/f).

Los terremotos en Chile ponen constantemente a prueba los códigos de diseño, la calidad de la infraestructura portuaria, vial, hospitalaria, la respuesta de los sistemas de alarma, organismos gubernamentales tales como ONEMI, Bomberos, Armada, Policial, Red Hospitalaria, entre todos los sistemas que se ven afectados por este tipo de fenómenos.

Debido a la magnitud de los terremotos de los cuales se tiene registro y de las posibles consecuencias que podrían tener, hacen necesario contar con un plan adecuado que pudiera disminuir los posibles efectos negativos y así contar con una estrategia apropiada que ayude a tomar buenas decisiones con el objetivo de recuperar la normalidad operacional en el menor período de tiempo posible.

En el puerto de Iquique, ITI² tiene la concesión del terminal 2, donde opera los sitios 3 y 4 (como se puede ver en la figura 1-1). La empresa ha desarrollado planes de expansión y de refuerzo de sus zonas de apoyo logístico con tecnologías que le permitan disminuir las deformaciones y efectos negativos de un sismo. Sin embargo, los últimos acontecimientos naturales, como los terremotos de Chile (2010-2014) y Japón (2011), dejan de manifiesto la necesidad de contar con un plan de continuidad de las operaciones portuarias, que incluya un análisis de riesgo y vulnerabilidad, que proporcione elementos de preparación ante una eventual interrupción de dichas operaciones, con el consecuente riesgo de pérdida de conectividad e impedimento en la entrega de apoyo logístico que una emergencia requiere en este tipo de situaciones.

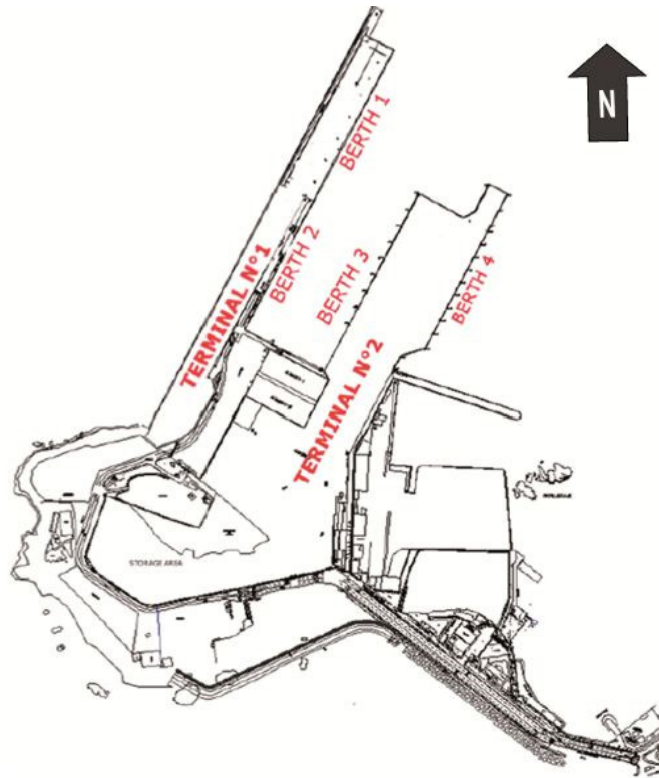


Figura 1-1, Layout del puerto de Iquique
Fuente: Tribunal de la libre competencia, citado en (Caselli, Beale, & Reyes, 2014)

Este proyecto busca proporcionar una herramienta que ayude a tomar decisiones adecuadas en situaciones que se visualiza falta de información histórica suficiente para la realización del análisis de riesgo necesario para la elaboración de un BCP en puerto.

² ITI: Iquique Terminal Internacional.

2 OBJETIVOS

Los objetivos planteados en esta investigación se detallan a continuación:

2.1 OBJETIVO GENERAL:

- Proponer una metodología para analizar el riesgo de daños mayores³ causado por un terremoto, para ser usado como insumo para la elaboración de un Plan de Continuidad de Negocios, (BCP⁴) de puertos, aplicado al terminal 2 del puerto de Iquique.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar y clasificar las tipologías de infraestructura portuaria utilizadas en Chile.
- Proponer una herramienta para el análisis de riesgos en la infraestructura portuaria en caso de un desastre por terremoto y tsunami.
- Establecer una relación de daños en la infraestructura del terminal 2 del puerto de Iquique ante los distintos escenarios de sismo.
- Generar recomendaciones que pudiesen disminuir la vulnerabilidad estructural del puerto.

³ Se entiende por daño mayor aquel que impida la realización de las operaciones de transferencia de carga

⁴ BCP: Business Continuity Management (Gestión de la continuidad del negocio)

3 MARCO TEORICO

El presente capítulo aborda los distintos fundamentos teóricos, fenómenos físicos y la línea investigativa que enmarcan este proyecto, como se puede ver en la Figura 3-1.

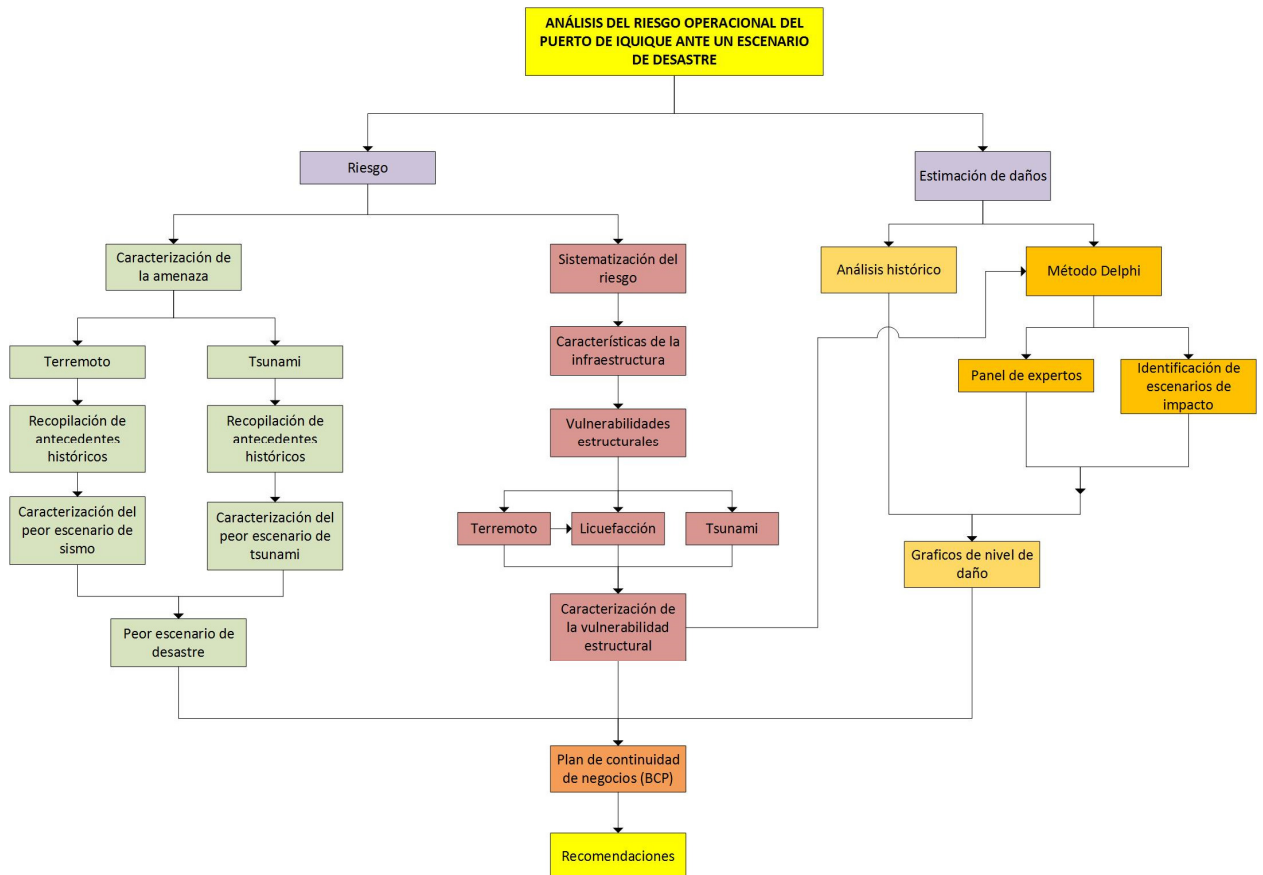
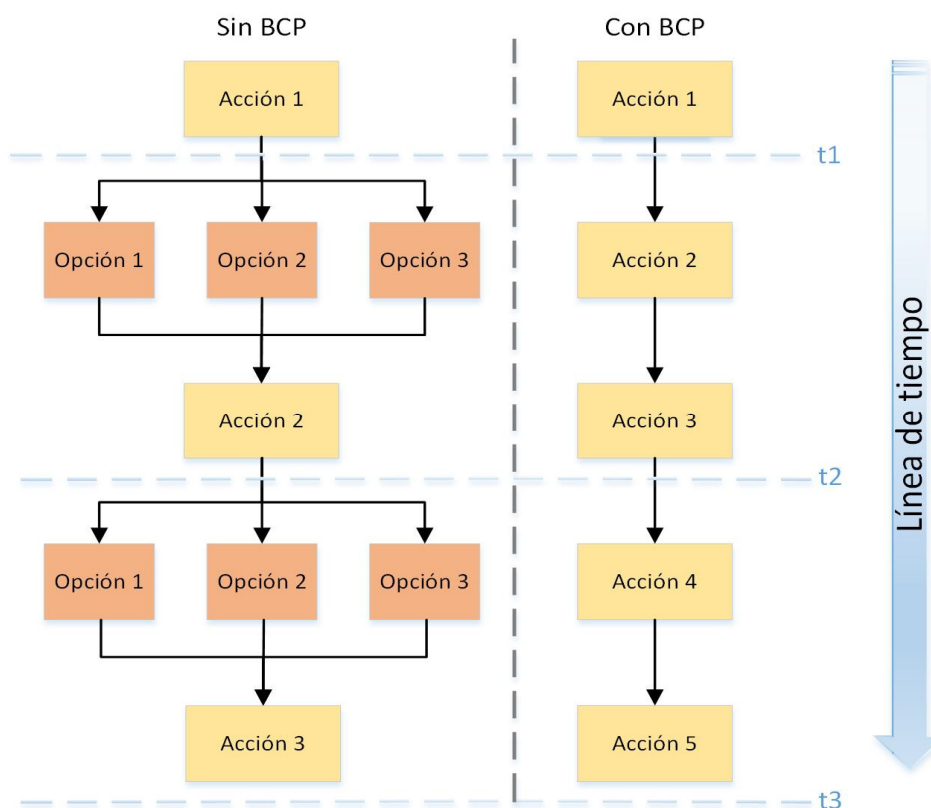


Figura 3-1, mapa conceptual de la línea de investigación
Fuente: Elaboración propia

3.1 PLAN DE CONTINUIDAD DE NEGOCIOS (BCP)

El BCP es un método utilizado para mejorar la capacidad de respuesta de un sistema local mediante la utilización de los puertos y bahías en períodos después de un desastre por terremoto (SATREPS Chile Working Group 4b, 2014).

Esta herramienta permite especificar qué actividades y operaciones son fundamentales para asegurar que una empresa pueda continuar con sus operaciones, luego de una interrupción de su normal funcionamiento (SANS Institute, 2002), además el BCP permite enfrentar la crisis de forma preparada, precisa y en el menor tiempo posible, como se aprecia en la Figura 3-2.



**Figura 3-2, Grafico comparativo de un plan de acción de una organización con y sin BCP.
Fuente: SATREPS CHILE WORKING GROUP 4b, 2014**

Los objetivos generales para mantener la actividad del negocio son asegurar la capacidad mínima de operación, manteniendo los sistemas de subsistencia saludables para tener una pronta recuperación y no perder la competitividad de la industria.

El grupo de trabajo SATREPS 4b (2016) propone una serie de procedimientos para el desarrollo de un BCP de puertos, el cual se divide en tres importantes etapas que evalúa el

potencial riesgo de inactividad operacional por eventos externos; la evaluación y análisis de riesgo (RA⁵), el análisis de impacto en el negocio (BIA⁶) y la estrategia de continuidad de negocio, como lo muestra la Figura 3-3.

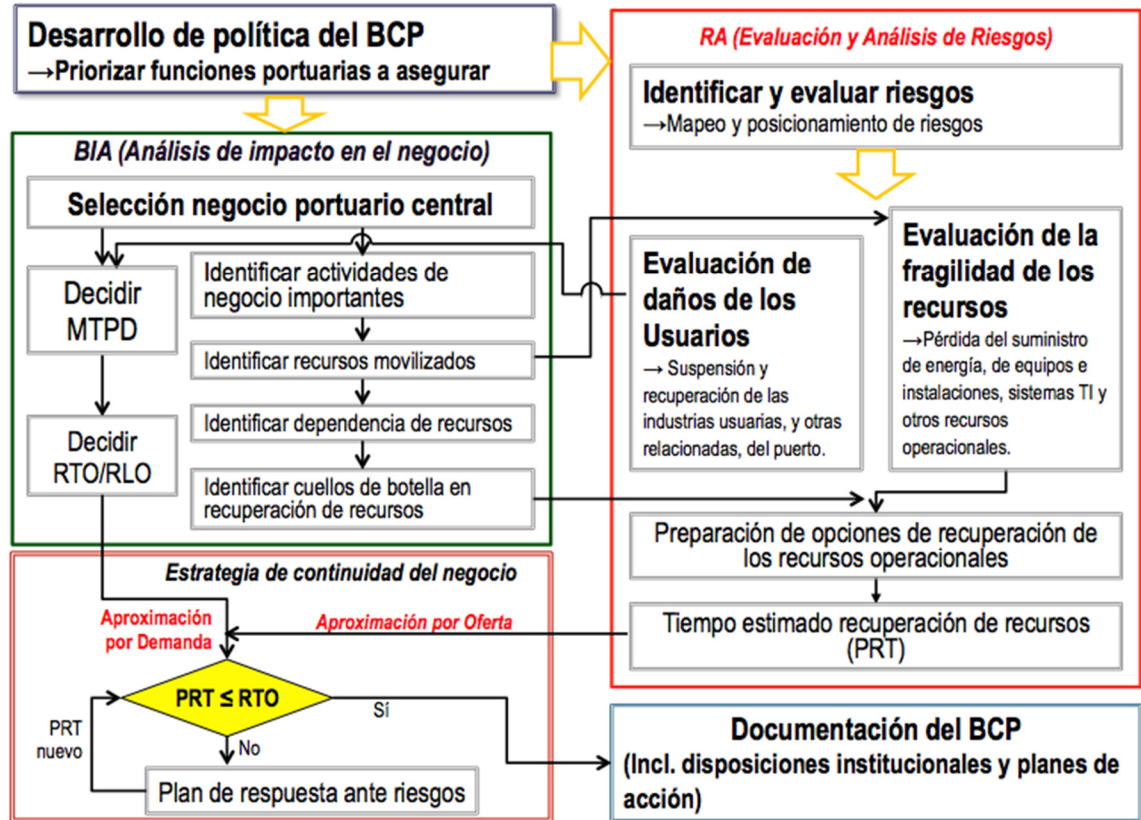


Figura 3-3, procedimientos para un BCP de puertos
Fuente: (SATREPS Chile Working Group 4b, 2014)

Este proyecto se enfoca en la evaluación y análisis de riesgo (RA), que tiene como objetivo evaluar el riesgo operacional ante el peor escenario de catástrofe, para así evaluar los recursos que son afectados y establecer un tiempo estimado de recuperación (PRT⁷)

El análisis de impacto en el negocio (BIA) busca determinar el impacto operacional y financiero asociado a un desastre, que puedan establecerse de forma objetiva y precisa el MTPD⁸, RTO⁹ y RLO¹⁰ (Caselli, Reyes, Beale, Akakura, & Ono, 2016).

⁵ RA: Risk assessment

⁶ BIA: Business impact analysis

⁷ PRT: Predicted resource recovery time

⁸ MTPD: Maximum tolerable period of downtime

⁹ RTO: Recovery time objective

¹⁰ RLO: Recovery level objective

Al momento del inicio de este proyecto ITI no cuenta con un BCP que prepare la organización para afrontar y mitigar los daños en la infraestructura, el posible impacto que pudiese tener en las operaciones portuarias y la pérdida de conectividad estratégica producto de la emergencia.

Considerando la importancia de este puerto para la zona norte, hace necesaria la implementación de un BCP, con el objetivo de disminuir la vulnerabilidad del puerto y de esta forma lograr disminuir el tiempo de inoperatividad, en caso de un terremoto, que genere daños que impidan la operación del terminal,

De acuerdo a la guía señalada para desarrollar el BCP, es necesario analizar el riesgo de la estructura; esto significa clasificar la tipología estructural, estimar los métodos de falla y clasificar los daños, para luego tomar medidas de recuperación que colaboren con la pronta vuelta de la organización al mercado.

3.2 ANALISIS DE RIESGO

Cuando se utiliza el término riesgo es posible obtener diversas definiciones, a través del enfoque y el área que el autor quiera abarcar, ya sea social, política o sistémica (Cardona, 2003). Esta investigación considera el riesgo como la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad, en otras palabras, si se interviene la amenaza o la vulnerabilidad, se está interviniendo el riesgo en sí, como se muestra en la Figura 3-4, Relación Riesgo-Amenaza-Vulnerabilidad, como concepto variable y fijo.

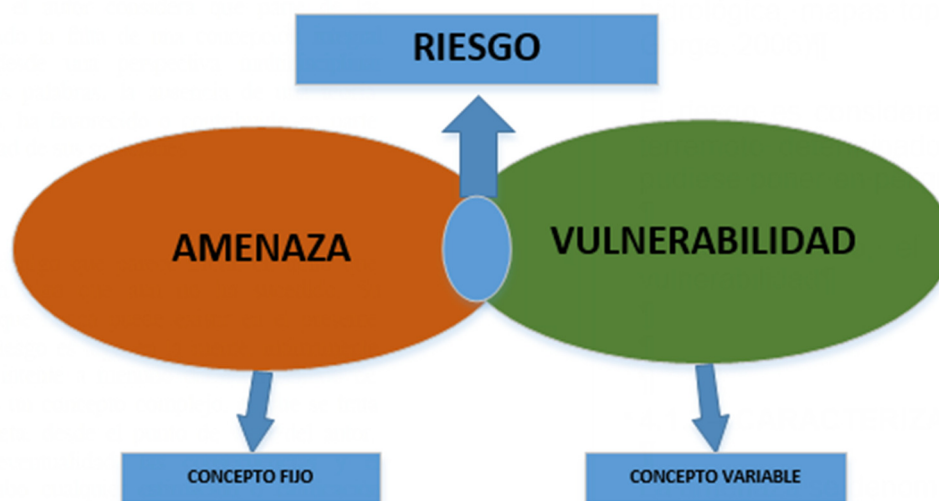


Figura 3-4, Relación Riesgo-Amenaza-Vulnerabilidad, como concepto variable y fijo.
Fuente: Elaboración propia

Esta relación considera que la determinación del riesgo abarca la evaluación del peligro, esta determina la ubicación y la magnitud de fenómeno natural que implica una amenaza, y su probabilidad de ocurrencia dentro de un lapso de tiempo y área determinado (Freeman, 2009). De acuerdo con Gorge (2006), estos estudios se basan principalmente en la información científica disponible e incluyen mapas geológicos, geomórficos y de suelos, información climática e hidrológica, mapas topográficos, fotografías aéreas e imágenes satelitales, etc. (Gorge, 2006).

El riesgo en este proyecto es estimar el nivel de daño que tendría la estructura ante un terremoto determinado, que pudiese poner en peligro la operatividad del puerto luego del evento sísmico.

Como se mencionó anteriormente, este proyecto no controla la amenaza (Terremoto) debido a que son fenómenos naturales no predecibles. Entonces para intentar disminuir el riesgo, será necesario intervenir los elementos expuestos a la amenaza mediante medidas de mitigación, que tengan como resultado esperado una disminución de su vulnerabilidad, por ende, un menor índice de riesgo.

3.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA

La amenaza se denomina a algún fenómeno natural o acción humana que constituya una posible causa de riesgo o perjuicio (Cardona, 2003). De acuerdo a lo señalado anteriormente, para esta investigación la principal amenaza será la ocurrencia de un terremoto en la zona y los posibles efectos colaterales del sismo, como licuefacción y tsunamis.

Chile se encuentra frente a una de las zonas de subducción más importantes del mundo, parte de la zona denominada cinturón de fuego del pacífico¹¹, y es considerado uno de los países con mayor actividad sísmica (CSN, s/f).

El registro histórico que proporciona el centro sismológico nacional entrega información desde 1570 a la fecha y da cuenta de 110 sismos con una magnitud de $M_s \geq 7.0$, de los cuales 31 cumplen ciertas características que los clasifican como terremoto del tipo tsunamigénico¹². Estos son capaces de producir un tsunami y el nivel de impacto dependerá de algunos aspectos físicos y morfológicos, según la zona donde se origine el terremoto (CSN, s/f).

Diversas investigaciones consideran que la zona de estudio se encuentra en medio de una laguna sísmica¹³, esto debido a que la tasa de retorno para eventos como los registrados en 1869 ($M_s = 7.5$) y 1877 ($M_s = 8.5$), de aproximadamente 121 ± 33 años (CSN, s/f), entonces

¹¹ Cinturón de fuego del Pacífico: Zona situado en las costas del Pacífico, concentra la mayor actividad sísmica y volcánica.

¹² Tsunamigénico: Se asocia a un terremoto que reúne las características para producir un tsunami.

¹³ Gaps o laguna sísmica: se denomina a la zona donde ha transcurrido mucho tiempo desde el último gran terremoto, acumulando una gran cantidad de energía.

la probabilidad de ocurrencia de un terremoto de gran magnitud es latente, por lo que habrá que tomar los resguardos necesarios para disminuir el riesgo controlando la vulnerabilidad.

Las diversas investigaciones, así como los recientes terremotos nos proporcionan una cantidad de información relevante sobre la generación, comportamiento, propagación e impacto que tiene en la población y la infraestructura, generando una mejor respuesta como comunidad y un reforzamiento en los códigos de diseño existentes.

En Chile no existe una norma sísmica para obras portuarias apoyadas en el fondo marino (Hidalgo, 2012), por lo que se utiliza la NCh2369, esta es un complemento de la NCh433 y fue modificada el año 2011 mediante el decreto n°61-2011.

El resultado de las investigaciones que se dieron posterior al 27F, respecto de los espectros de aceleraciones y las características particulares del terremoto del 2010, obtenidos a partir del análisis de los registros sísmicos, hizo ver la necesidad de ajustar el espectro de aceleración de la norma existente, como se puede apreciar en la Figura 3-5.

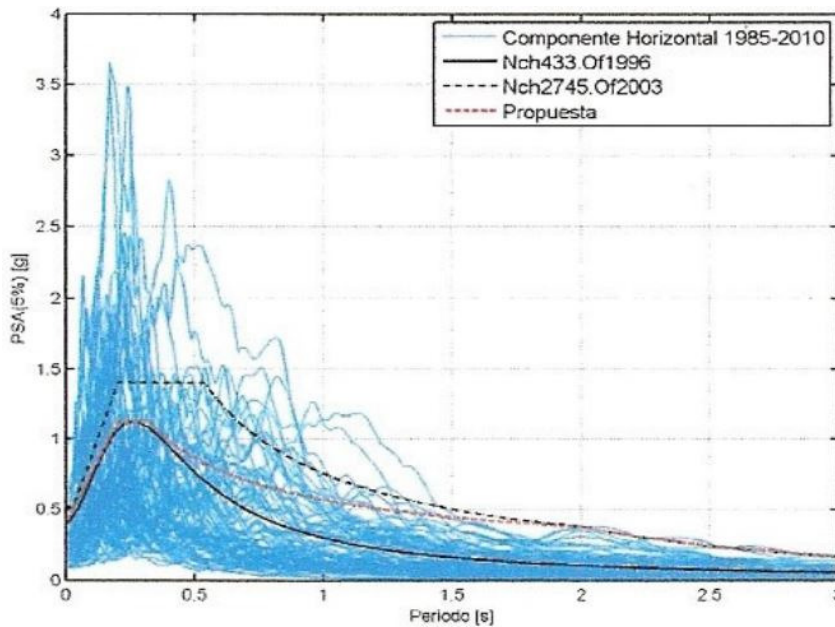


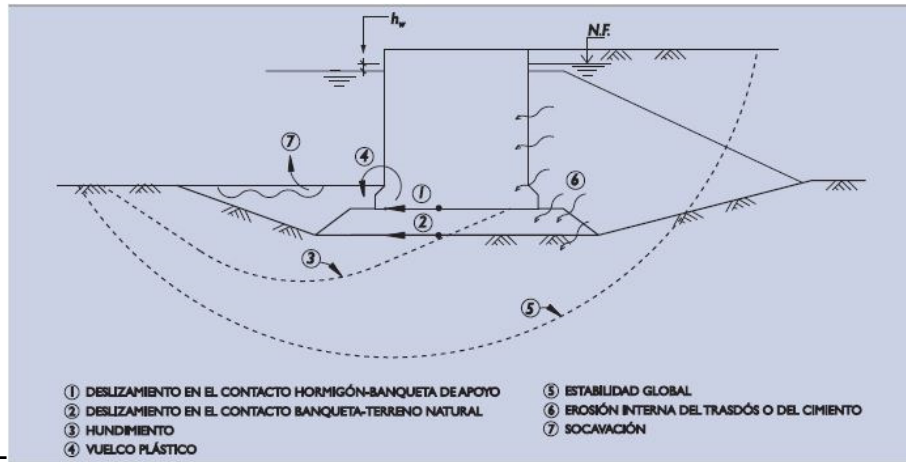
Figura 3-5, Espectros de pseudo aceleraciones y propuesta.
Fuente: (Riddell, 2011)

A partir de lo anteriormente expuesto, este estudio define la vulnerabilidad como la fragilidad de la estructura al impacto de terremoto.

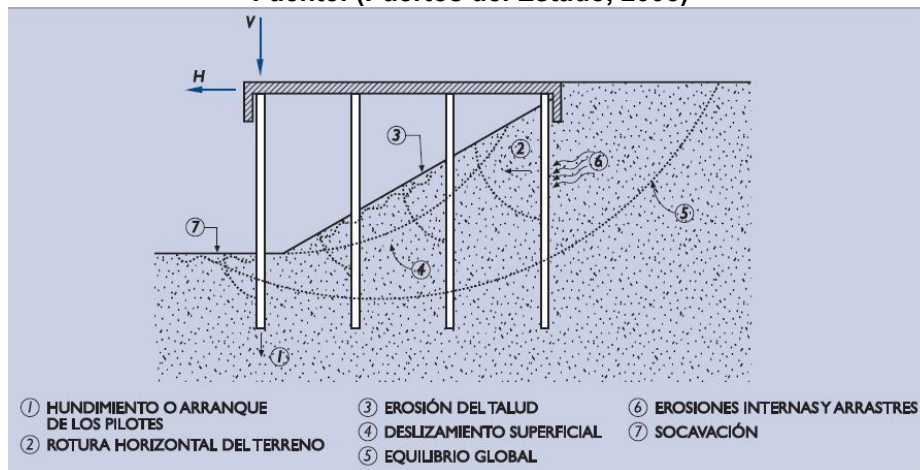
3.2.2 CARACTERIZACION DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es un factor de riesgo interno de que un sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza (Cardona, 2003), por consiguiente, la propuesta aplicada a esta investigación considera la vulnerabilidad como la posibilidad que un puerto sufra daños estructurales, que impidan su operación producto de un terremoto.

Son diversos los tipos de daño que pueden afectar a los muelles, sin embargo esta investigación considero los métodos de falla geotécnicos propuestos la ROM (Puertos del Estado, 2005), que dan cuenta de 7 métodos de falla que pueden afectar la estructura del puerto de Iquique, que se compone principalmente de un muelle de bloques de hormigón, con una extensión de pilotes del sitio 4, cómo se muestran en la Figura 3-6 y Figura 3-7.



**Figura 3-6, Modo de fallo en muelles de bloques de hormigón.
 Fuente: (Puertos del Estado, 2005)**



**Figura 3-7, Modos de fallo geotécnico en muelles de pilotes.
 Fuente: (Puertos del Estado, 2005)**

Los tipos de falla propuestos por la R.O.M. considerados en este estudio **esta dado** como la vulnerabilidad que tiene el muelle de sufrir daños por fallas geotécnicas ocasionadas por un terremoto, por consiguiente, se puede establecer que el nivel de daños está directamente relacionado con la magnitud de la amenaza.

Marco Saravia (2017) en su estudio “Análisis de riesgos infraestructurales en el puerto de Iquique ante eventos de terremoto y tsunami”, realizó un levantamiento de los daños evidenciados en los puertos de Chile que fue complementado con lo propuesto por González & Verdugo (2012) y por EPI (2014), respecto a los daños generados por los terremotos de magnitud M_w : 8.8 del 2010 y M_w : 8.2 del 2014, que evidenciaron una gran cantidad de fallas del tipo geotécnicas, de similitud con las propuestas por la ROM; sin embargo no se establece una graduación del nivel de daño.

Una forma de establecer una relación entre el tipo de falla y el nivel de daño es a través de la tabla de graduación de daños estructural propuesto por el EERI (Earthquake Engineering research institute, 1996), que entrega una descripción y un estado de daño en términos porcentuales, como se ve en la Tabla 3-1, Tabla de graduación de daños

Nivel	Estado de daño	Descripción de daño
Ninguno	0%	Sin daño.
Ligero	0% - 5%	Daño no estructural aislado; costo de reparación menos al 5% del valor del mercado de la estructura.
Moderado	5% - 25%	Daño considerable no estructural y daño estructural ligero; costo de reparación menos al 25% del valor de mercado.
Severo	25% - 50%	Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo; Costo de reparación menor al 50% del valor de mercado.
Total	50% - 100%	Más económico demoler que reparar.
Colapso	> 100%	Colapso de la estructura.

Tabla 3-1, Tabla de graduación de daños
Fuente: (Earthquake Engineering research institute, 1996)

Esta tabla entrega en términos porcentuales el nivel y la descripción de daño, que son utilizados como una guía para evaluar el daño que puede afectar la estructura portuaria del terminal 2. Una vez que se tiene identificado la falla y el nivel, es posible tomar medidas de preventivas, correctiva o de contingencia que disminuyan el nivel de daño en el muelle, por lo cual disminuye directamente la vulnerabilidad, esto se explica a continuación.

3.3 TERREMOTO

Terremoto es una palabra compuesta que proviene del latín *terra* “tierra” y *motus* “movimiento”, este es un fenómeno natural de la tierra que produce una rápida liberación de energía, la cual es percibida como una vibración de la superficie (Gutiérrez I. , s/f).

De forma similar a las ondas producidas cuando se lanza una piedra a un estanque de agua, un terremoto genera ondas sísmicas que irradian a través de la Tierra, aun cuando la energía de las ondas sísmicas se disipa rápidamente conforme se alejan del hipocentro, los cuales son registrados por instrumentos sensibles de diferentes centros de investigación, localizados todo el mundo (CSN, s/f). Para la clasificación de los sismos es utilizada tradicionalmente la escala de Richter, como se muestra en la Figura 3-8.

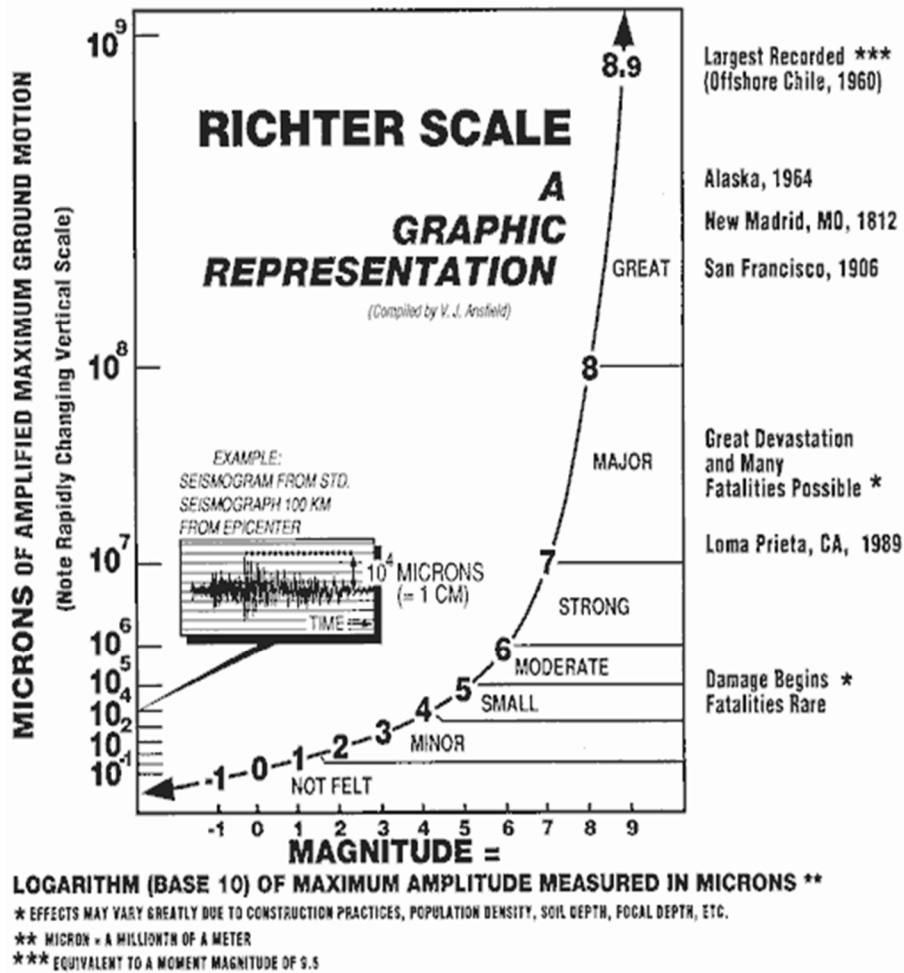


Figura 3-8, Escala de Richter.
Fuente: (Hernández, 2011)

Esta escala tenía problemas para medir los sismos de alta liberación de energía, para mejorar esta medida en 1979 fue introducida una modificación por Thomas Hanks y Hiroo Kanamori, investigadores del instituto de tecnología de California, la cual complementa la escala de Richter, (Hernández, 2011). Esta se llama escala sismológica de magnitud de momento (M_w), mide la energía total que se libera en un terremoto junto con el área de ruptura de la falla.

3.3.1 MECANISMOS DE GENERACIÓN

Diversos son los mecanismos de generación de un terremoto, entre los que destacan la actividad volcánica, los movimientos tectónicos, el impacto de meteorito, actividad humana (explosiones, actividad minera) (ONEMI, s/f).

En Chile la mayoría de los sismos son generados por el desplazamiento de la corteza terrestre, producto de la subducción¹⁴ de la placa de Nazca con la placa Sudamericana, (ONEMI, s/f).

La primera zona de contacto entre las placas se produce la zona denominada fosa, que ocurre bajo el océano costa afuera del continente, como se muestra en la Figura 3-9.

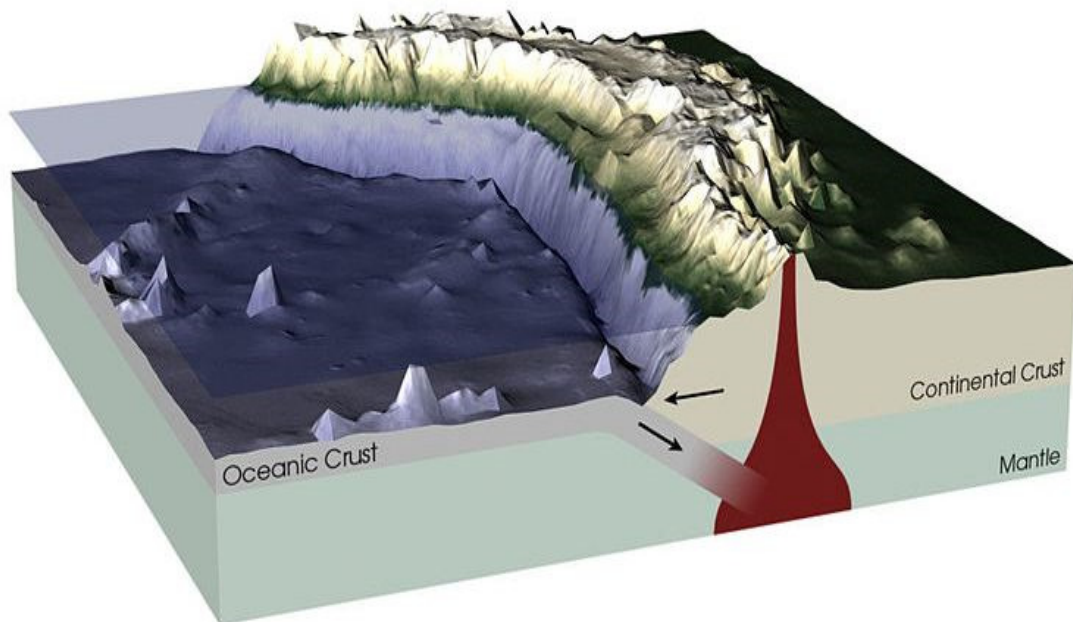


Figura 3-9, Primera zona de contacto inter placa.
Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Fosa_oce/C3/A1nica

La placa de Nazca, constituida por corteza oceánica, más densa, se desliza por debajo de la placa Sudamericana. La velocidad de convergencia varía según la zona, entre 6.5 a 9 cm/año, como se aprecia en la Figura 3-10.

¹⁴ Subducción: Proceso mediante el cual parte de la corteza oceánica se sumerge bajo la placa continental.

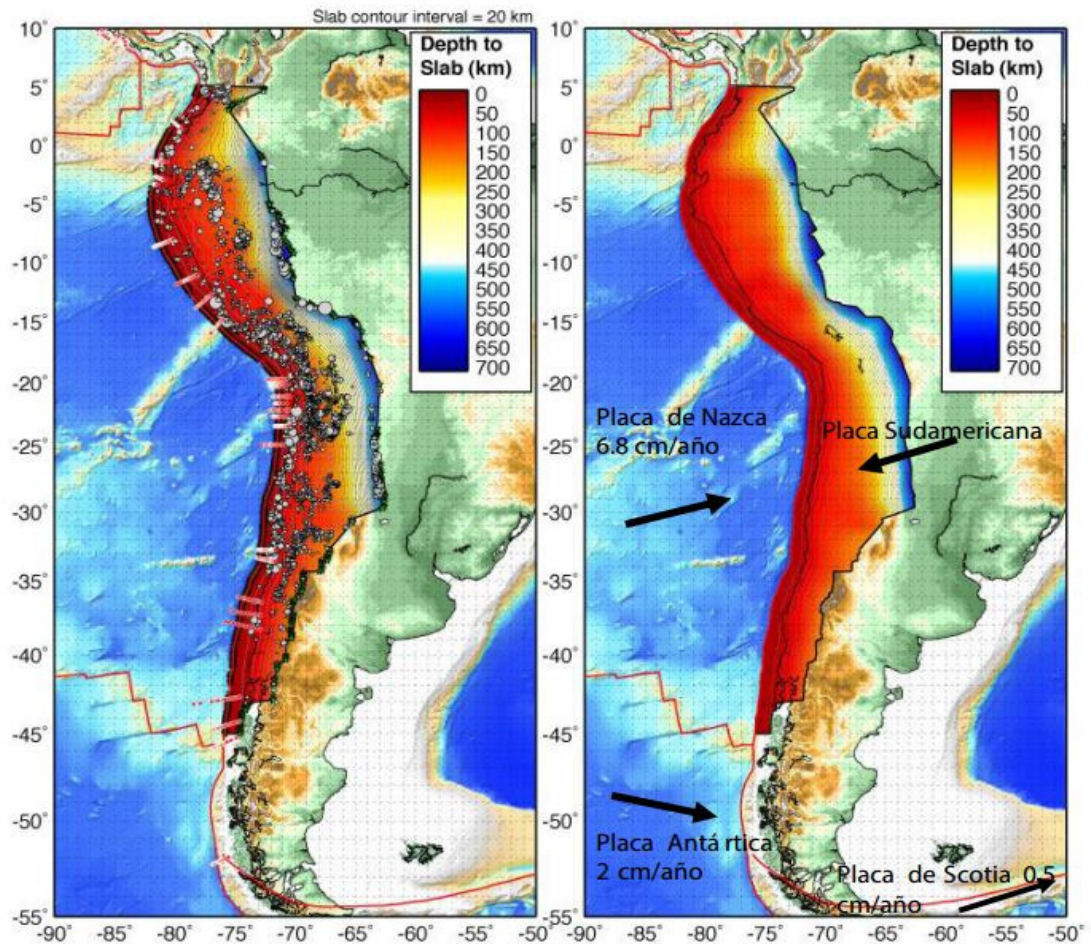


Figura 3-10, Dirección y velocidad de convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana
Fuente: <http://earthquake.usgs.gov/data/slab/>

Ambas placas se encuentran "trabadas", producto de la fricción que existe en la zona de contacto entre ellas, lo que provoca un aumento de la tensión, produciendo una acumulación constante de energía, la que llega a un punto donde esa energía acumulada es capaz de moverse, generando la ruptura y un movimiento sísmico.

Este movimiento sísmico puede ser generado a lo largo de la zona de contacto, como se muestra en la Figura 3-11, con lo cual es posible clasificar ese sismo, según la ubicación

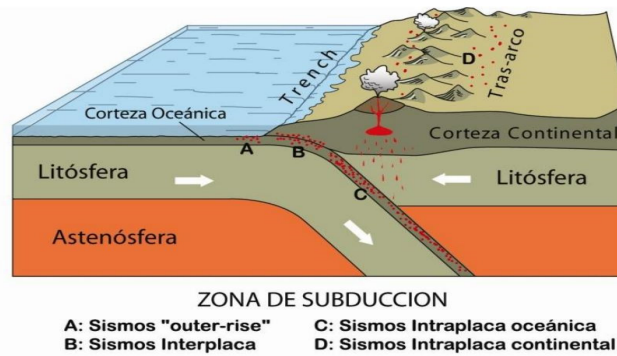


Figura 3-11, Zona de subducción placa de Nazca/Sudamericana, tipos de sismos.
Fuente: (CSN, s/f)

3.3.2 TIPOS DE SISMOS INTERPLACA

- A. Sismos "outer-rise": Es producido por la flexión de la placa de Nazca previa a la subducción. Por lo general genera eventos de magnitud moderada a distancias mayores a 150 km de la costa. Debido a la zona donde se genera este tipo de sismo, existe la posibilidad, dependiendo de la magnitud, que se produzca un tsunami. (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010)
- B. Sismos Interplaca: Es la zona de contacto de las placas Sudamericana y de Nazca, extendiéndose desde la fosa hasta unos 50 a 60 km de profundidad. (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010). Si la magnitud del evento sísmico es de lo suficientemente grande, tiene altas probabilidades de generar un tsunami, como lo ocurrido en el terremoto de Valdivia de 1960 ($M_w = 9.5^{15}$), y el terremoto de Cobquecura de 2010 ($M_w = 8.8$). (CSN, s/f)
- C. Sismos Intraplaca-oceánica: Se denomina a la zona interna donde se produce la subducción, debido al peso de la placa y fuerte acoplamiento interplaca, va desde los 50 a 200 km de profundidad. (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010). Es muy poco probable que un sismo de esta categoría produjera un tsunami, casos históricos de este tipo de eventos son los terremotos de Chillán en 1939 ($M_s = 8.3^{16}$), y Punitaqui en 1997 ($M_w = 6.5$). (CSN, s/f)
- D. Sismos Intraplaca-continental: La sismicidad se genera al interior de la placa Sudamericana, debido a la deformación generada por el proceso de subducción generando el alzamiento de la cordillera de los Andes, a una profundidad menor de 30 km. (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010). Eventos sísmicos como el terremoto de Las Melosas de 1958 ($M_w = 6.3$), en el sector de Cajón del Maipo, Santiago. (CSN, s/f)

¹⁵ M_w : escala sismológica de magnitud de momento, es una escala logarítmica base 10, usada para medir y comparar terremotos.

¹⁶ M_s : Magnitud de ondas superficiales, resume en una cifra la energía liberada en el terremoto.

3.3.3 ACTIVIDAD SÍSMICA EN IQUIQUE.

Al igual que todo el territorio chileno continental situado al norte de la península de Taitao, región de Aysén, Iquique está situado cerca del contacto entre la subducción de la placa de Nazca respecto a la placa Continental. Esta ubicación hace que las localidades costeras tengan una alta sismicidad.

La alta actividad sísmica registrada en la historia, contrasta con la actualidad, debido principalmente que el último gran terremoto ocurrió en 1877, por lo que la tensión acumulada hace que esta zona sea denominada “Laguna sísmica”, como se aprecia en la Figura 3-12.



Figura 3-12, Laguna sísmica en el norte de Chile.

Fuente: <http://www.anip.cl/wp-content/uploads/2010/05>, revisado 16/06/2016

El historial sísmico de Iquique indica que el último gran terremoto¹⁷ fue en 1877, de una magnitud estimada de $M_s > 8.5$. Posteriormente se registraron terremotos en 1933, 1967, 2007 y 2014, con magnitud del orden de $M_w = 8$ (Ruiz, y otros, 2015). Además, según los

¹⁷ Mega terremoto: Se considera a eventos sobre una magnitud de $M_w:8.1$.

antecedentes históricos, se puede estimar que existieron a lo menos 3 grandes terremotos, en 1450, 1543 y 1615, como se muestra la línea de tiempo de la

Las zonas con mayor probabilidad histórica de ocurrencia de un terremoto es la considerada laguna sísmica. Es posible apreciar en la Figura 3-13, las distintas fechas y magnitud de los terremotos que han afectado la costa del pacífico

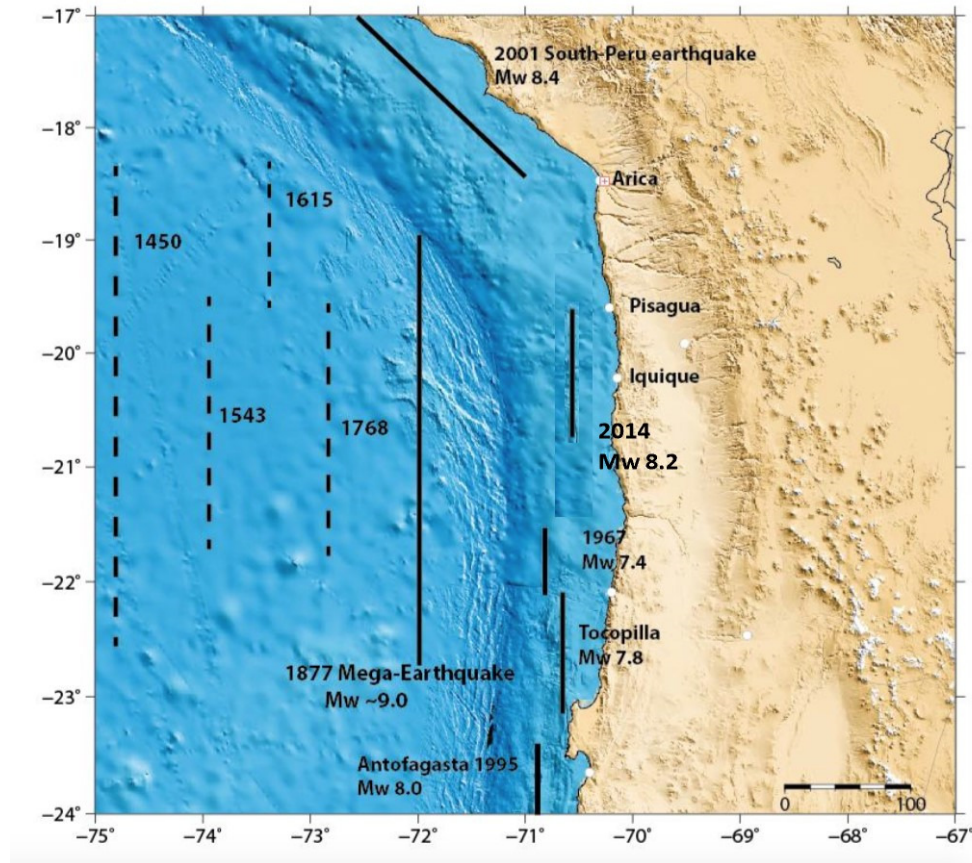


Figura 3-13, Línea de tiempo de terremotos históricos con largos estimados de ruptura. Fuente: (Ruiz, y otros, 2015)

Es posible estimar que cada alrededor de 150 años se espera un gran terremoto, lo que en Iquique no ha pasado aún, produciendo una zona denominada laguna sísmica, esto es debido a que el terremoto del 2014 ($M_w = 8.2$), no liberó la totalidad de la energía acumulada que se esperaba, en consecuencia, la probabilidad de que se produzca un gran terremoto aumenta con pasar del tiempo.

Es posible que en las zonas costeras, luego de un terremoto que libere mucha energía, se produzcan fenómenos como licuefacción y tsunamis, como se pudo apreciar en el terremoto del 2010 (González & Verdugo, 2012), ambos eventos son colaterales al sismo y se detallarán a continuación.

3.4 LICUEFACCIÓN

La licuefacción¹⁸ es un fenómeno físico que le ocurre a los suelos que son sometidos a acciones dinámicas, como las vibraciones de los terremotos, suele producirse en áreas donde los materiales no consolidados están saturados con agua. Bajo esas condiciones, lo que había sido un suelo estable se convierte en un fluido móvil que no es capaz de soportar edificios ni otras estructuras.

Producto del movimiento sísmico, la presión del agua comienza a aumentar lo que produce que la interacción de las partículas del suelo pierdan cohesión entre sí, lo que conlleva a la pérdida de toda capacidad de soporte y rigidez del suelo (PIANC, 2001), provocando daños e inestabilidad de la infraestructura.

El terremoto de Niigata ocurrido el 16 de junio de 1964 de magnitud $M_s = 7.5$, ocasionó daños severos en las estructuras de la ciudad. Edificios de hormigón, como el que se observa en la Figura 3-14 sufrieron daños por licuefacción, se aprecia que el cambio de suelo hizo perder su capacidad portante, lo que provocó el volcamiento de la estructura.



Figura 3-14, Daños por la licuefacción de suelos durante el terremoto de Niigata, Japón 1964
Fuente: (Gutiérrez I. , s/f)

¹⁸ Licuefacción proviene de liqueo “ser fluido” y facio “hacer”

Debido al alto nivel de saturación de los suelos portantes en obras marítimas, existe una alta probabilidad de sufrir los efectos de la licuefacción, como los observados en Kobe el 17 de enero de 1995 de $M_w = 7.3$. La Figura 3-15 muestra los efectos de subsidencia de los pavimentos, producto de la caída por volcamiento del muro de retención de rellenos, produciendo el hundimiento de la superficie.



Figura 3-15, Daños en el puerto de Kobe 1995
Fuente: (KUMAGAI, 2011)

Como consecuencia de lo anterior, los efectos en otras tipologías de puertos, como los muelles de pilotes, es recurrente ver efectos como asentamiento e inclinación de pilotes en los puertos luego de un terremoto, como se aprecia en la Figura 3-16, del catastro de daños ocasionados en puerto de Coronel el año 2010 (González & Verdugo, 2012)-

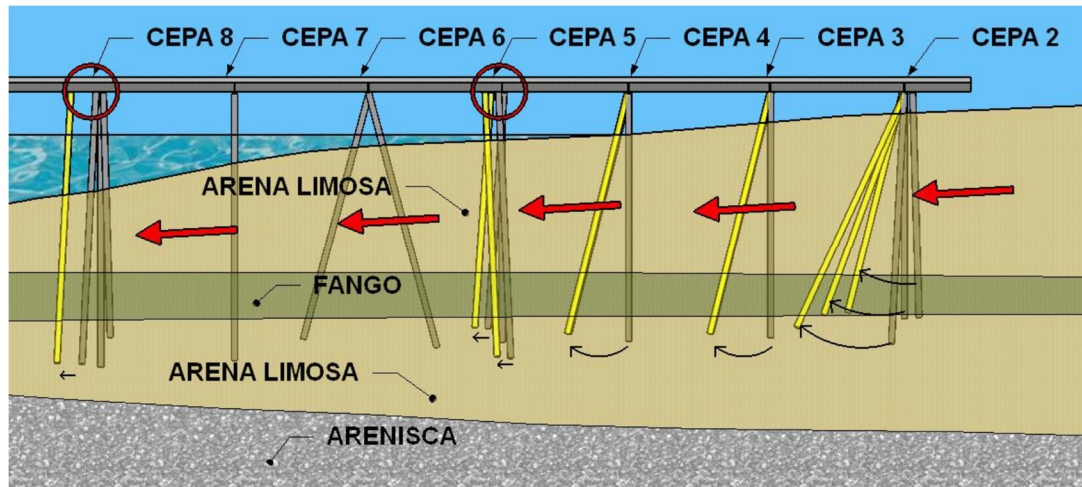


Figura 3-16, Efectos de la licuefacción en el puerto de coronel.
Fuente: (González & Verdugo, 2012)

Debido a la pérdida de la estabilidad del suelo por licuefacción y la pendiente del suelo, ocasionó que la carga de las arenas saturadas desplazara de los pilotes en dirección al mar, este fenómeno es conocido como lateral spreading, y es inducido por la licuefacción. (Brunet, 2012), como se muestra en la Figura 3-17.

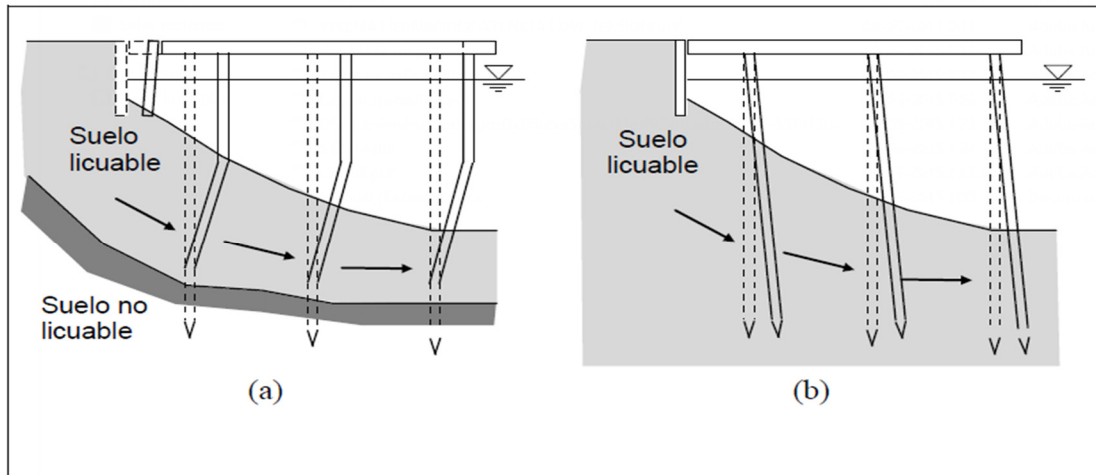


Figura 3-17, Tipos de falla por lateral spreading
Fuente: (Brunet, 2012)

Los fenómenos naturales estudiados en esta investigación, dos de estos afectan de manera simultánea (terremoto, licuefacción), como se explicó anteriormente. Mientras que el tsunami puede tardar de varios minutos a varias horas antes azotar la estructura. Las diferencias de los tipos de tsunami se explicarán a continuación.

3.5 TSUNAMI

Tsunami es una palabra compuesta que proviene del japonés y significa ola de puerto. En algunas partes del mundo este fenómeno también es conocido como Maremoto. Un terremoto, erupción volcánica, caída de meteoritos o deslizamiento de tierra son algunos de los diversos mecanismos de generación.

Esta investigación hace referencia a un tsunami donde el mecanismo de generación sea un terremoto del tipo “Tsunamigénico”, que cumpla con las siguientes características:

- El área de ruptura del sismo o una parte mayoritaria, este bajo el lecho marino y a una profundidad menor a 60 km.
- Debe ocurrir una zona de hundimiento de borde de placa tectónica, es decir, que la falla tenga movimiento vertical y no sea solamente de desgarre con movimiento lateral.
- Un evento sísmológico de gran y rápida liberación de energía en un lapso de tiempo, y que ésta sea eficientemente transmitida.

Bajo las características señaladas anteriormente, el sismo genera una rápida liberación de energía que produce un desplazamiento de las placas, el cual ocasiona un movimiento vertical en la columna de agua, como se puede mostrar en la Figura 3-18.

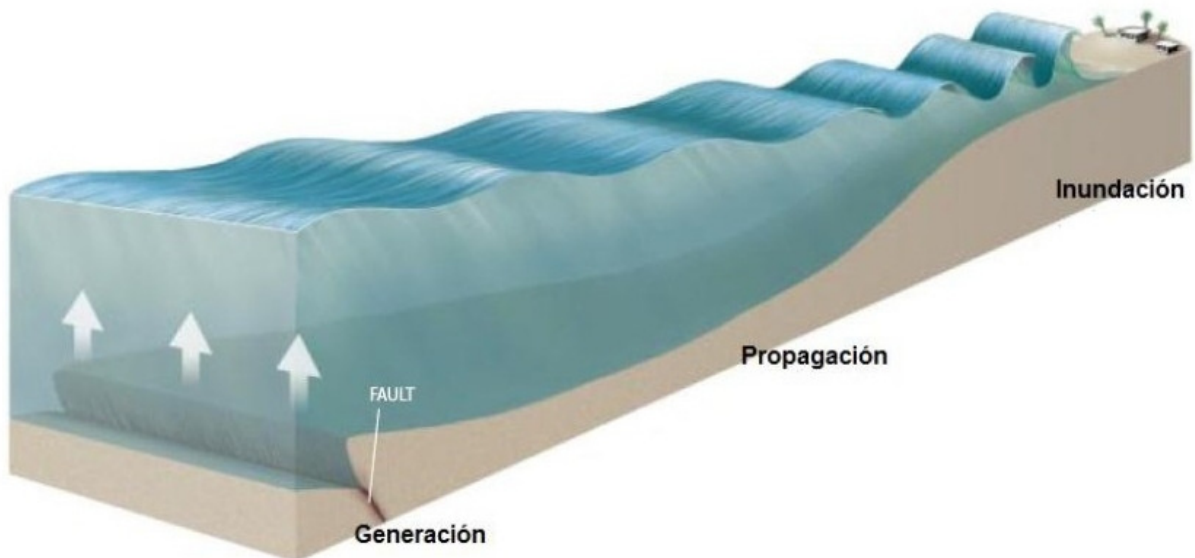
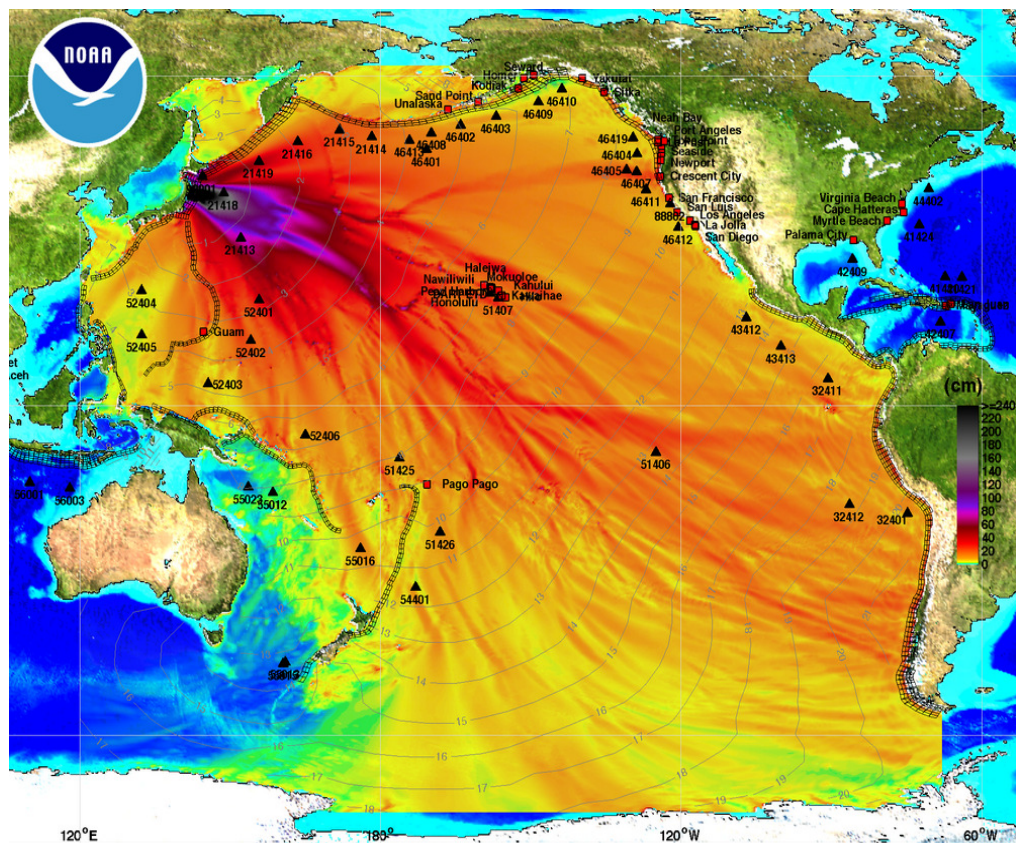


Figura 3-18, Generación de un tsunami por un sismo.
Fuente: (Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional, 2016)

Esta columna de agua desplazada genera un tren de olas largas que se propagan rápidamente desde el punto de origen hacia la costa, con periodos de 5 a 60 minutos. Al aproximarse a la línea de costa, sufren una deformación en su altura y periodo, la que asociada a su velocidad y la cantidad de energía, tienen un gran poder destructor e inundación. (Departamento de desarrollo regional y medio ambiente, 1991).

En Chile el principal mecanismo de generación de tsunami son terremotos sobre $M_w = 7.5$, con hipocentro oceánicos de una profundidad inferior a 60 km. La magnitud del tsunami puede aumentar y/o disminuir según la magnitud y profundidad del foco del sismo, mientras que el tiempo de arribo a la costa dependerá de si el tsunami es de campo cercano o campo lejano. (Lagos, 2000).

Un tsunami de origen cercano es donde el mecanismo generador está cerca de la línea de costa, donde el arribo del tren de olas generadas son algunos minutos. Mientras que uno de origen lejano, es uno donde el mecanismo de generación está en regiones lejanas a la costa, el cual debido a la magnitud del terremoto, se puede propagar por el océano y llegar a la costa de otras regiones en horas, como se aprecia en la Figura 3-19.



Actualmente la comunidad internacional está estudiando los efectos, daños y formas de mitigar los efectos de un tsunami, compartiendo una red internacional con sistema de monitoreo y alerta de toda la región del Océano Pacífico, conocido como anillo de fuego, ya que concentra el 75% de los volcanes activos e inactivos del mundo. Este anillo se extiende desde Nueva Zelanda hasta el borde oriental de Asia, continúa en el norte por la región de las Islas Aleutianas de Alaska, sigue a lo largo del borde occidental hacia el sur de América.

La exposición de nuestra zona de estudio a este tipo de eventos, crea la necesidad de tomar todas las medidas necesarias para resguardar a la población y minimizar los daños.

La probabilidad de que estos fenómenos pudiesen llegar a causar daños a la infraestructura portuaria de ITI y el nivel de estos, será estimada mediante la aplicación de un método cualitativo (Delphi).

3.6 MÉTODO DELPHI

El método Delphi consta de un proceso de comunicación grupal para tratar un problema complejo, donde se debe escoger un panel de expertos a los que se les pregunta su opinión sobre cuestiones referidas a acontecimientos del futuro. Las estimaciones de los expertos se realizan en sucesivas rondas, anónimas, con el objetivo de tratar de conseguir consenso, pero con la máxima autonomía por parte de los participantes. Por lo tanto, la capacidad de predicción del método se basa en la utilización sistemática de un juicio intuitivo emitido por un grupo de expertos. En resumen, el método Delphi procede por medio de la interrogación a expertos con la ayuda de cuestionarios sucesivos. (Turoff, 2013)

Las características principales son:

- Anonimato: Mientras dura el proceso de consulta, ningún experto conoce la identidad de los otros que componen el grupo de debate. Con esto se elimina la posibilidad de que un miembro del grupo sea influenciado por la reputación de otro de los miembros o por el peso que supone oponerse a la mayoría. Permite que un experto pueda cambiar sus opiniones sin que eso suponga una pérdida de imagen.
- Iteración y retroalimentación controlada: La iteración se consigue al presentar varias veces el mismo cuestionario, agregando o quitando preguntas según la opinión del grupo. Además, se pueden presentar los resultados obtenidos con los cuestionarios anteriores, para que los expertos vayan conociendo los distintos puntos de vista y puedan ir modificando o continuar sosteniendo su opinión ampliando sus argumentos.
- Respuesta del grupo en forma estadística: La información que se presenta a los expertos no es sólo el punto de vista de la mayoría, sino que se presentan todas las opiniones indicando el grado de acuerdo que se ha obtenido.

El método Delphi se considera un método cualitativo, su formulación teórica comprende varias etapas sucesivas de envíos de cuestionarios, de vaciado y de explotación, en buena parte de los casos puede limitarse a dos, tres o cuatro etapas.

Este método no ha sido utilizado en estimación de daños en Chile, convirtiéndolo en un procedimiento pionero en el área, por lo que se tomarán todas las consideraciones para entregar una cantidad determinada de información al experto, quien la complementará con el dominio que tiene en área y así contestar de la forma más objetiva posible, manteniendo siempre dentro de los parámetros establecidos en el método Delphi.

4 SITUACIÓN ACTUAL

Ubicado a 1.758 km al norte de Santiago, el puerto de Iquique está en la costa norte de Chile, en la región de Tarapacá, como muestra la Figura 4-1, en una zona de inflexión geográfica respecto a la geografía costera



Figura 4-1, Ubicación geográfica de Iquique.
Fuente: Elaboración propia.

Las coordenadas geográficas, respecto al faro Punta Molo son:

Latitud : 20° 11' 59" S

Longitud : 70° 09' 25" W

Las instalaciones de este puerto son utilizadas para la transferencia de carga contenedorizadas, gráneles sólidos y líquidos, automotoras y fraccionada, convirtiéndolo en el más importante puerto de la zona norte del país, con la mayor proyección por el sector donde se encuentra emplazado (una isla), la ciudad no lo limita su crecimiento físico (Caselli, Beale, & Reyes, 2014).

La estructura delimitada con rojo en la Figura 4-2, corresponde a la zona que se aplicará el método cualitativo Delphi.



Figura 4-2. Área de estudio.
Fuente: Elaboración propia

La zona que se **estudiara** corresponde al terminal n°2, constituido principalmente por una estructura mixta de bloques de hormigón con un anclaje sísmico y una extensión de la estructura de pilotes. En esta zona atracan las embarcaciones y en la explanada operan grúas para la transferencia de carga.

Las características geométricas, equipamiento de manejo de carga y las naves que atracan se detallan a continuación

Frente		Sitios		Calados			Explanadas de apoyo	
N°	Longitud total	Sitios	Longitud	Bitas	Calado Permitido	Referente	Área	Superficie
	m	N°	m	N°	mt	Bitas N°	m ²	Materiales
2	335 + 280	3	335	19+30	9,3	21 a 30	16.500	Pavimento de hormigón y adocretos
		4	280	31+40	9,1	37 a 39	14.000	

Tabla 4-1, dimensiones y características de los sitios de atraque.

Fuente: Puerto de Iquique

El equipamiento que posee el terminal de ITI consta de:

Equipo	Cantidad	Capacidad nominal (ton)
Grúa Gottwald HMK280	2	100
Grúa Liebherr LHM400	2	100
Reach Stacker	4	45
Top-lifter	3	30
Grúa Horquilla	2	3
Ramplas contenedor	14	30

Tabla 4-2, equipamiento para el manejo de carga del terminal ITI

Fuente: (PRDW Aldunate Vásquez, 2008)

Las naves que atracan en el terminal tienen las siguientes características:

Tipo	DWT ¹⁹ [ton]	Desplazamiento [ton]	Eslora [m]	Calado [m]	Manga [m]
Portacontenedores Panamax 1	75.000	54.000	270	11.4	32.2
Portacontenedores Postpanamax	100.000	110.000	348	11.4	40.0
Graneles	40.000	49.000	208	11.4	30.2
Carga general	20.000	26.700	177	10.0	23.4

Tabla 4-3, barcos de diseño para el sitio 4

Fuente: (PRDW Aldunate Vásquez, 2008)

¹⁹ DWT: Deadweight tonnage, acrónimo del termino español TPM, tonelaje de peso muerto.

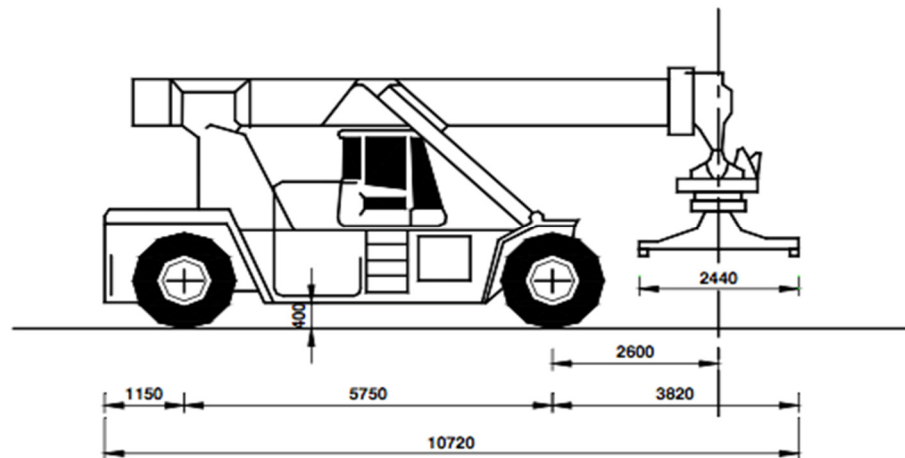


Figura 4-3, grúa reach stacker
Fuente: (PRDW Aldunate Vásquez, 2008)

Para el desarrollo de las operaciones al interior del terminal portuario, se utilizan la grúa del tipo Reach Stacker, mientras que para la transferencia de carga del buque al terminal se utiliza la grúa del tipo Gottwald HMK280 y la Liebherr LHM400.

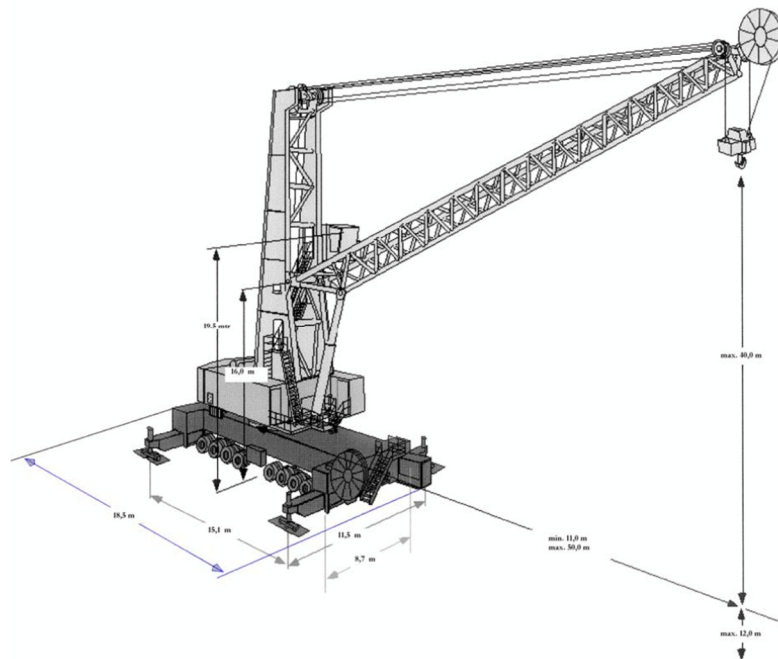
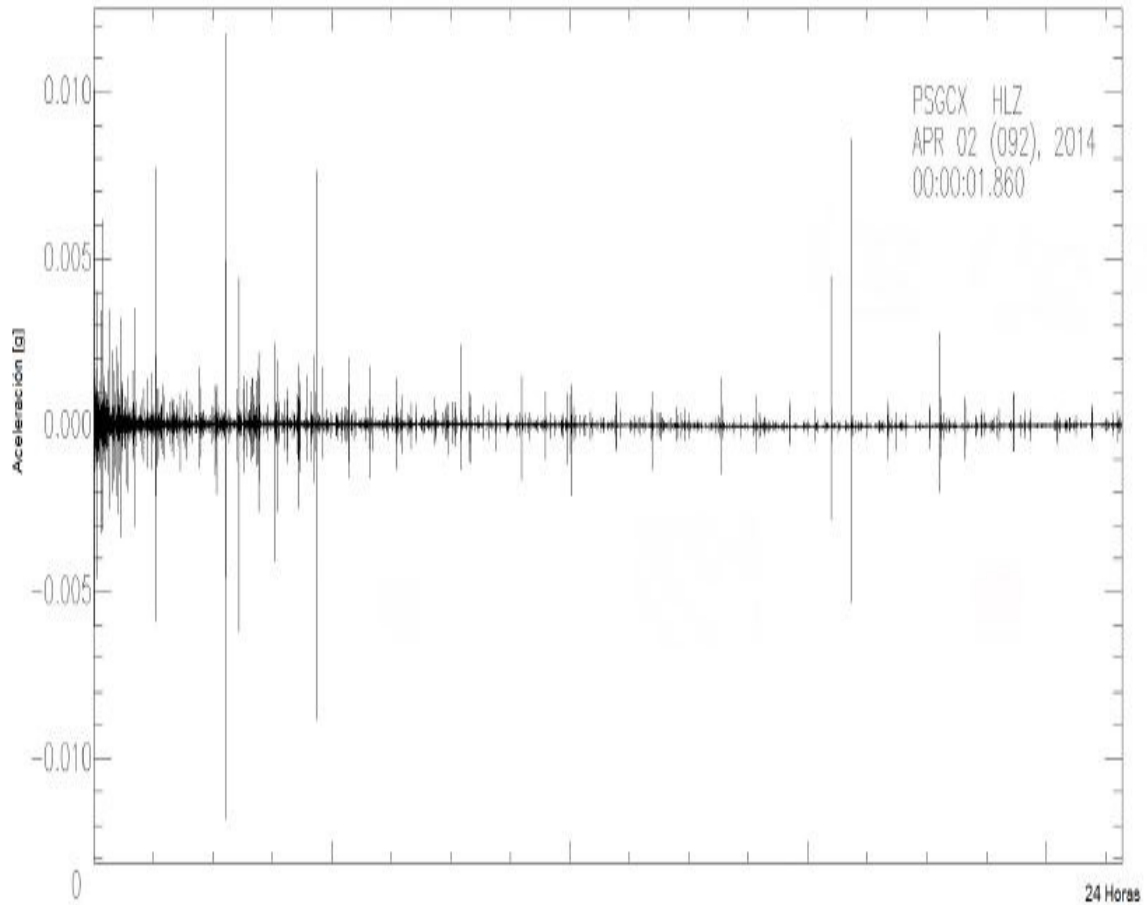


Figura 4-4, grúa Gottwald HMK280
Fuente: (PRDW Aldunate Vásquez, 2008)

Un desastre natural puede ocurrir en cualquier momento, por lo cual se deben tomar todas las medidas preventivas para afrontar un terremoto como el que se produjo el año 2014. Este evento activó las alarmas, debido a que ocurrió en una zona donde se encuentra una laguna sísmica identificada de los años 70's (CSN, s/f). Este sismo es uno de los más documentados en Chile y el mundo del último tiempo, como se muestra en la Figura 4-5. (Ruiz, y otros, 2015).



**Figura 4-5, Registro del acelerograma PSGCS, correspondiente al terremoto del 2-04-2014.
Fuente: (Ruiz, y otros, 2015)**

Considerando lo anterior, cada barra vertical corresponde a un evento sísmico durante las primeras 24 horas, datos entregados por el CSN de la Universidad de Chile, investigadores de distintas universidades, hicieron que este evento fuera bien registrado por sismógrafos, acelerógrafos, GPS e inclinómetros. Estas permitieron monitorear todo el terremoto $M_w = 8.2$ (Ruiz, y otros, 2015), como muestra la Figura 4-6, un modelo numérico de acoplamiento de las placas durante el terremoto.

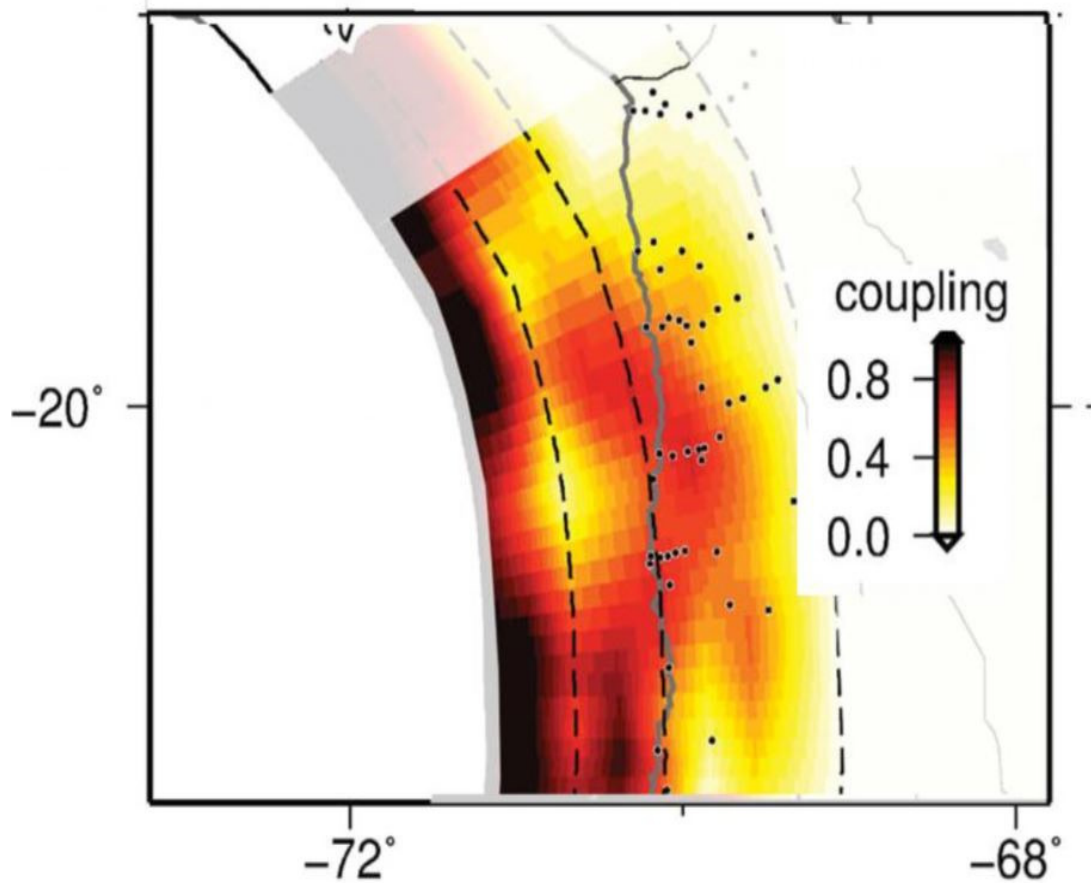


Figura 4-6, Mapa de acoplamiento.
Fuente: (Ruiz, y otros, 2015)

Los registros sobre el comportamiento de estos eventos son una herramienta muy importante para la comprensión de estos fenómenos y sus implicancias en nuestro sistema.

4.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

El terminal 2 se compone de un espigón, que cuenta con un frente de atraque (sitio 3) de bloques de hormigón con un sistema de refuerzo sísmico, mientras que el otro frente de atraque es el sitio 4, es una extensión de pilotes, como se muestra en la Figura 4-7. Ambas estructuras se detallarán en los siguientes capítulos.

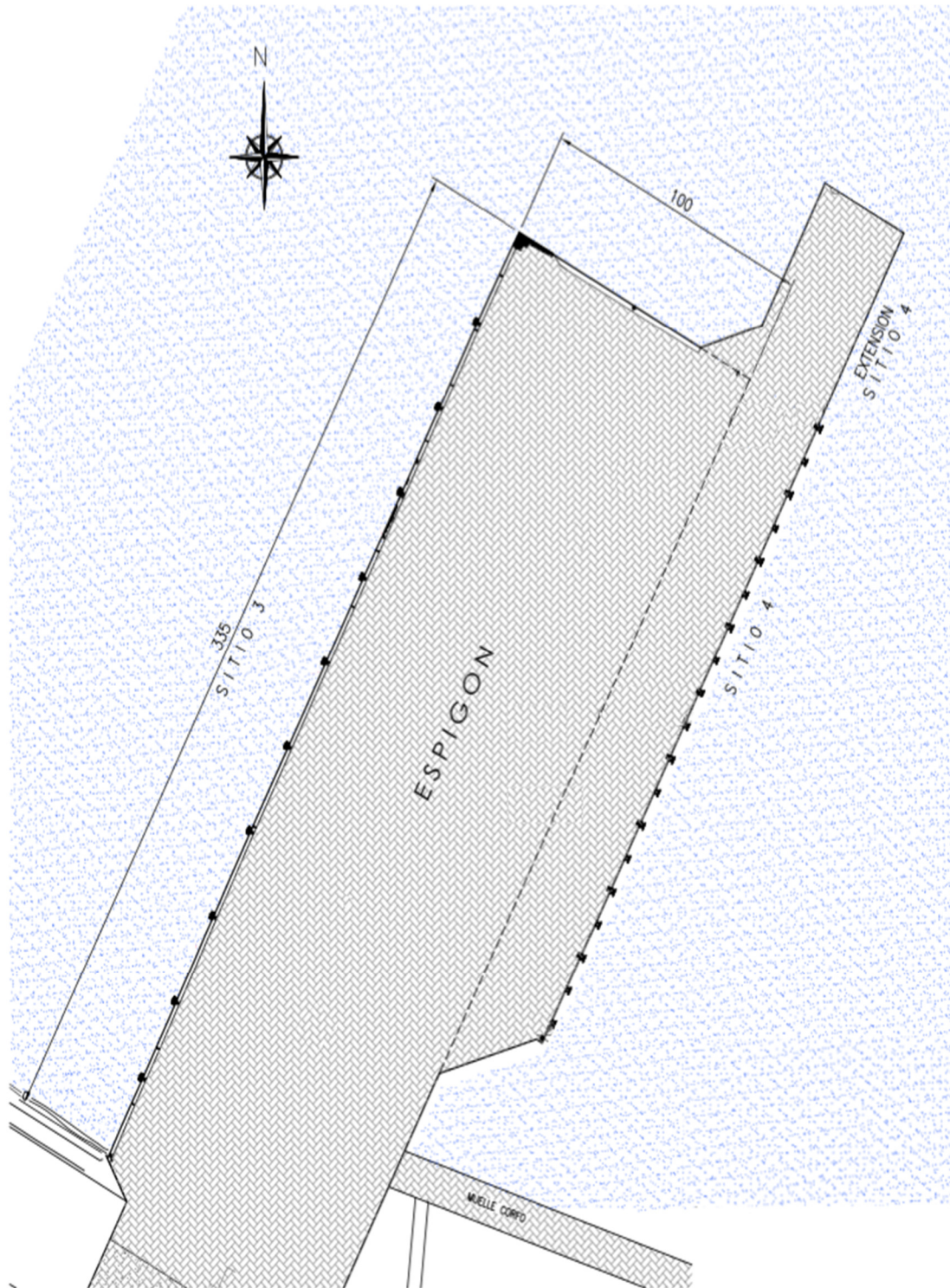


Figura 4-7, Ubicación general espigón y los frentes de atraque, correspondientes a sitios 3, 4 y extensión sitio 4.

Fuente: (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010)

4.1.1 SITIO 3

El sitio 3 es una estructura compuesta por un muro de bloques de hormigón con una cota de coronamiento promedio de ± 3 [m] (NRS²⁰), una cota de fondo marino de 9.7 [m] y está apoyado sobre una cama de enrocado. La Figura 4-8 muestra la configuración estructural de los bloques de hormigón que componen el frente de atraque (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010).

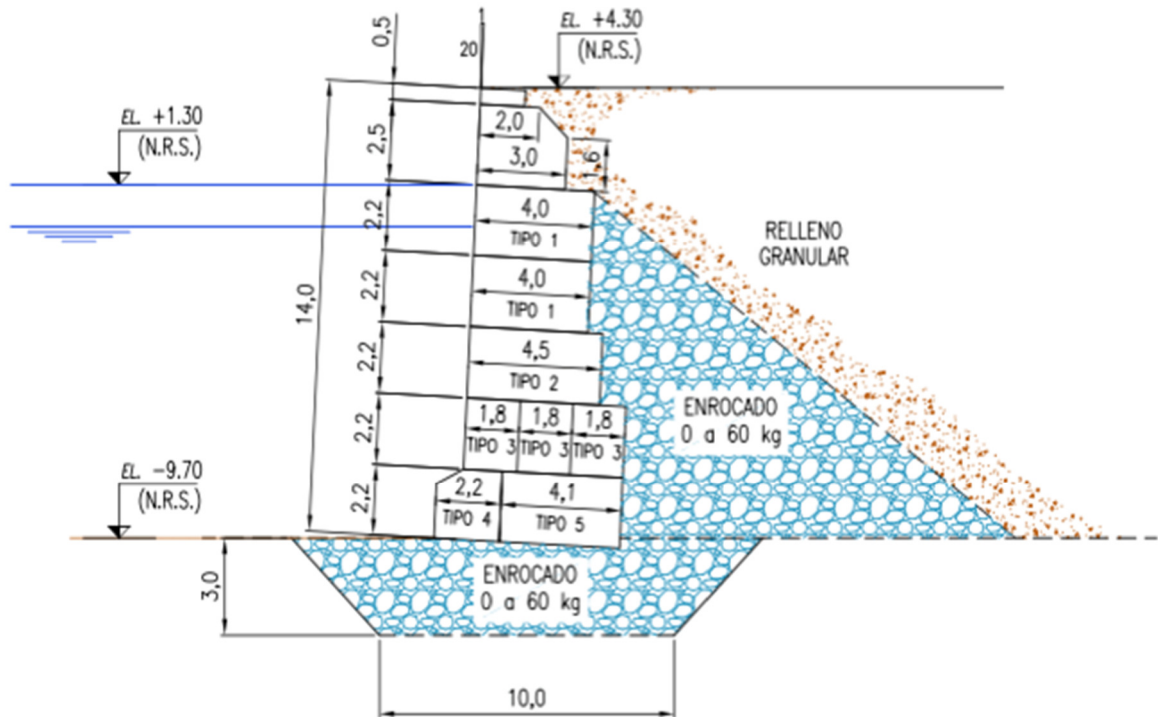


Figura 4-8, Configuración estructural sitio 3.
Fuente: (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010)

Según las consideraciones geotécnicas preliminares del proyecto de reforzamiento sísmico, realizado por (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010), el frente de atraque habría sufrido una ligera inclinación hacia el lado del mar, producto del incremento del empuje y/o por la densificación de los materiales de apoyo.

Dada esta condición de asentamiento, ITI reforzó la estructura mediante un refuerzo asísmico con una batería de tensores post-tensados anclados a la roca basal, para reducir la magnitud

²⁰ NRS: En Chile se utiliza como el nivel de reducción de sondas del plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la luna en perigeo

de un posible deslizamiento y/o volcamiento que comprometan la estabilidad del sitio 3 frente al sismo que se consideró en el diseño, Figura 4-9.

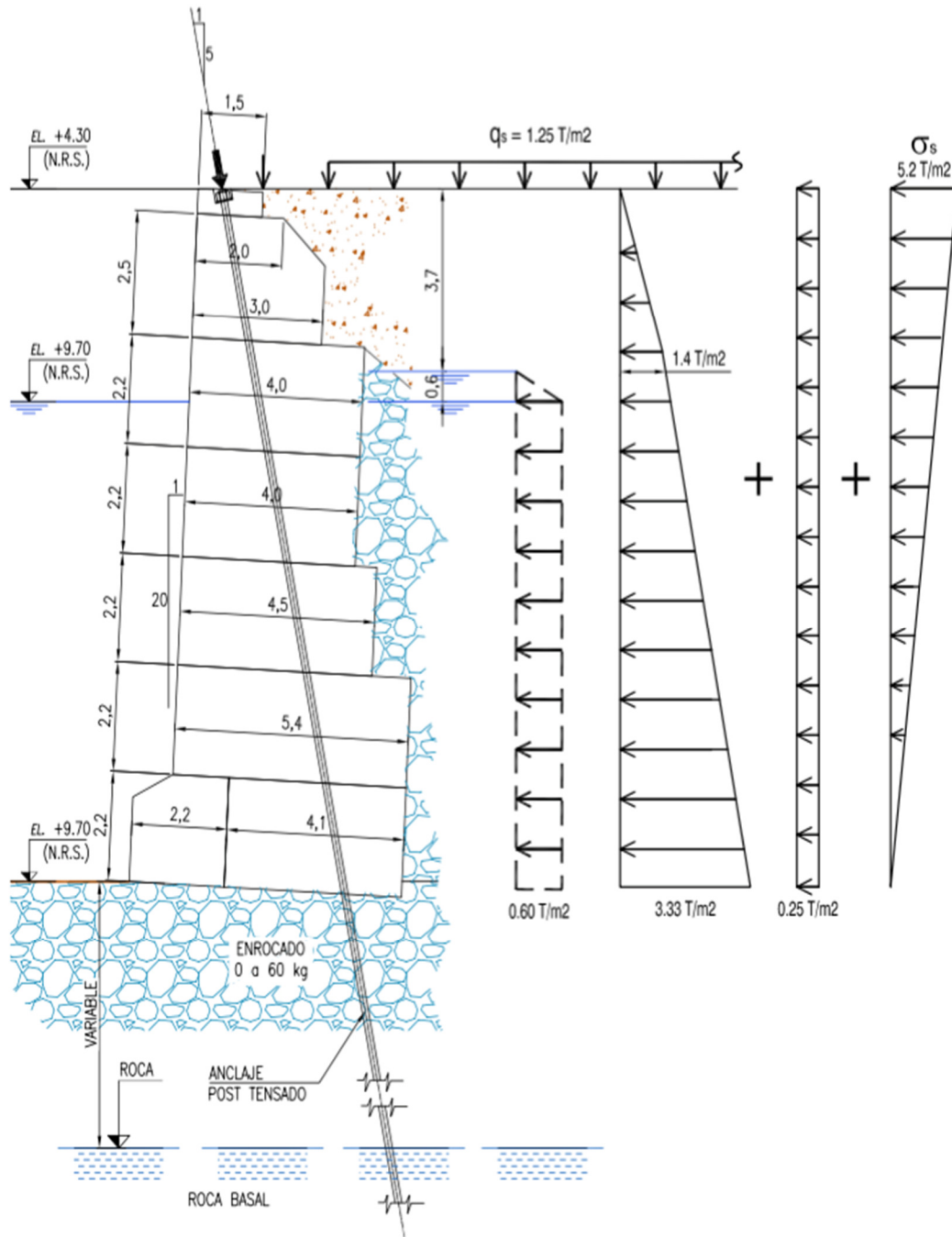


Figura 4-9, Modelo para analizar el refuerzo con tensores.
Fuente: (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010)

4.1.2 SITIO 4

El sitio 4 es una estructura diseñada y construida para que tenga un adecuado comportamiento en caso de un terremoto, clasificándolo como uno de puertos de Chile que ha realizado refuerzos asísmico a su infraestructura expuesta.

Como se muestra en la Figura 4-7, el frente de atraque correspondiente a la extensión del sitio 4 forma parte del terminal 2, que fue construido a partir de una estructura de penetración (bloques de hormigón) para luego extender la superficie al mar mediante el uso de pilotes de acero, formando así una extensión del espigón de bloques de hormigón existente (similar al sitio 3), como se aprecia en las Figura 4-10 y Figura 4-10.

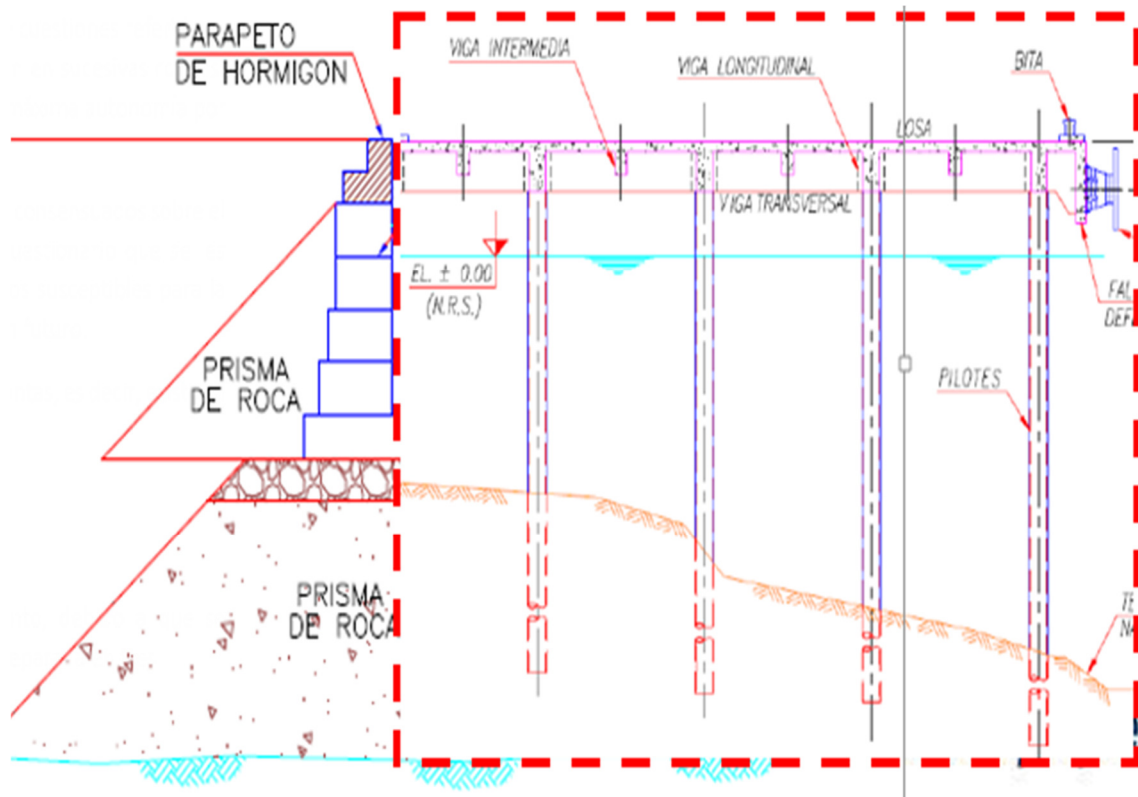


Figura 4-10, Sección transversal de la extensión del sitio 4.
Fuente: (EPI, 2014)

Entre los criterios considerados para el diseño y construcción de esta obra se encuentran la operatividad (buques de diseño y requerimientos de navegación), vida útil (50 años) y el cumplimiento de todas las normas de referencia (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010).

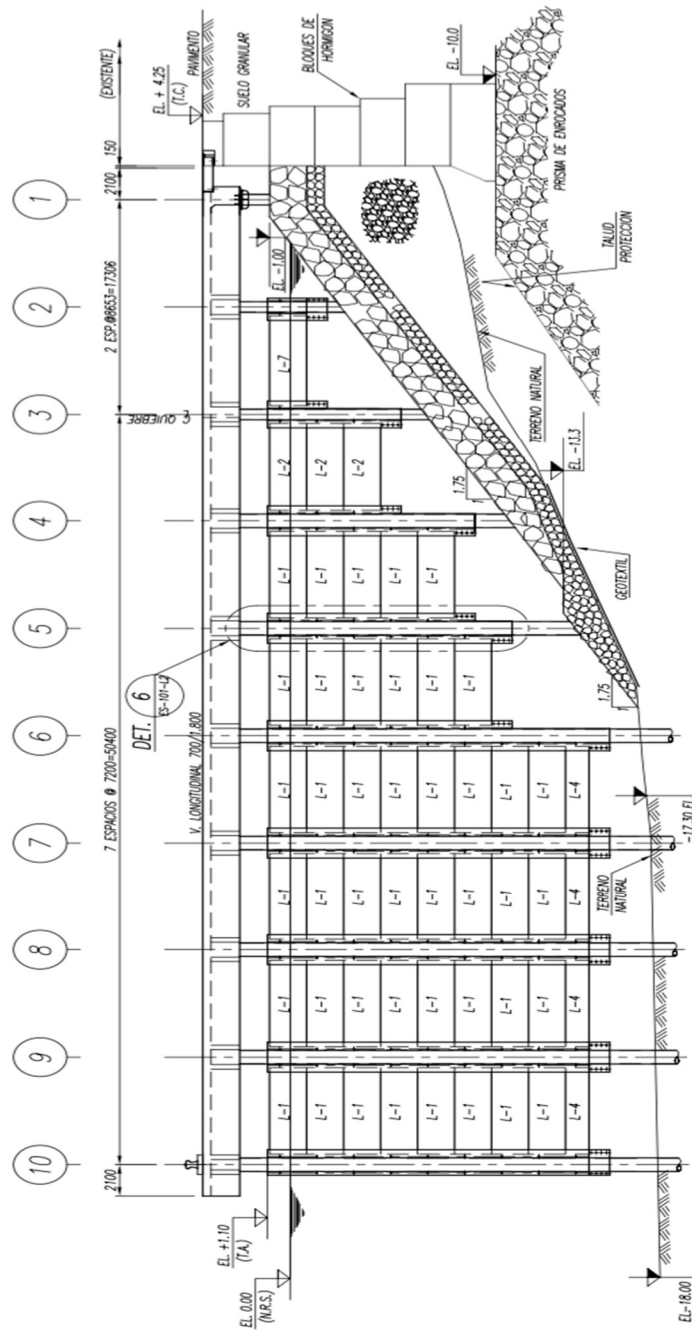


Figura 4-11, Sección tipo referente a la extensión del sitio 4.
Fuente: (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010)

El reciente terremoto (2014), generó a este puerto algunos daños, que serán abordados en el siguiente capítulo.

4.2 EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS POR TERREMOTO

Los daños generados en el puerto de Iquique por el terremoto del 2 de abril del año 2014, de magnitud $M_w = 8.2$, fueron recopilados y evidencian que el daño se concentró a lo largo del frente de atraque del sitio 3, como muestra la Figura 4-12.

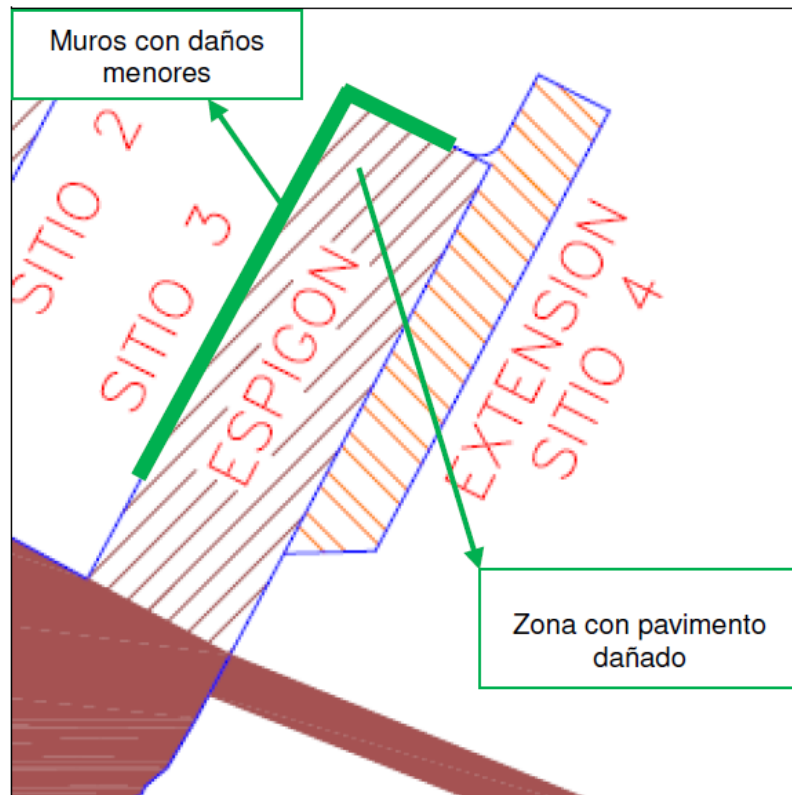


Figura 4-12, Daños en sitios 3-4 correspondiente a ITI.
Fuente: (EPI, 2014)

La clasificación y estimación del daño fue resultado de una evaluación detallada del estado del puerto mediante la inspección submarina, batimetría, topografía e inspección de las autoridades, quienes encontraron problemas de asentamiento de los pavimentos y desplazamiento de los bloques a lo largo del sitio 3.

Los daños del sitio 3 fueron considerados menores, ya que no ponían en riesgo la estabilidad de la estructura, como muestran las Figura 4-13 y Figura 4-14.



**Figura 4-13, daño por socavación de la explanada a lo largo del frente de atraque del sitio 3.
Fuente: (EPI, 2014)**



**Figura 4-14, daño en el cabezo del espigón por socavación.
Fuente: (EPI, 2014)**

Las consideraciones sismoresistente implementadas por ITI durante el año 2011 a los sitios 3 y 4 muestran un buen comportamiento de la estructura, ya que el nivel y el tipo de daño posible fueron aminorados de manera significativa, como por ejemplo el sitio 4 no sufrió daños.

5 METODOLOGÍA

En esta etapa se realizará una descripción general de los pasos **que a seguir** para la materialización del proyecto:

5.1 DEFINICIÓN ESCENARIO DE DESASTRE

Este proyecto considera la definición de un escenario de desastre para ser caracterizada la amenaza. Los criterios de elección utilizados en la elección del escenario de desastre fueron en base a los antecedentes sísmicos históricos de la ciudad de Iquique, como aparecen en la Tabla 5-1.

Fecha	Región	Ubicación Origen	Magnitud (Ms)	Distancia Epicentral (km)	Profundidad (km)
24-08-1869	Iquique	-	7.5	-	-
05-10-1871	Iquique	-	7.3	-	-
09-05-1877	Iquique	Fuera de Costa	8.8	-	50
15-09-1911	Iquique	-	7.3	-	-
22-02-1933	Iquique	Fuera de Costa	7.6	95	40
14-03-1943	Iquique	Cordillera	7.2	40	150
01-12-1943	Iquique	Centro	7.0	45	80
25-04-1949	Iquique	Cordillera	7.3	120	110
14-06-1959	Iquique	Cordillera	7.5	125	100
28-11-1970	Iquique	Centro	7.0	85	33
30-11-1976	Iquique	Cordillera	7.3	137	82
13-06-2005	Iquique	Cordillera	7.8	110	111
01-04-2014	Iquique	Fuera de Costa	8.2	89	39

Tabla 5-1, antecedentes sísmicos de Iquique.

Fuente: Elaboración propia, a partir de (CSN, s/f) y (GEOVENOR Ingenieros Consultores, 2010)

El puerto fue construido entre los años 1928 y 1932, por lo que, a excepción del terremoto de 2014, fueron 8 los sismos que azotaron la estructura con una magnitud $M_s \geq 7$, en la región epicentral de Iquique, que fueron probablemente responsables de los desplazamientos y asentamientos de bloques del sitio 3 mencionados en el capítulo 4.1

Considerando las características técnicas utilizadas por el SHOA²¹ (anexo 9.1) que utilizó el terremoto del 9 de Julio de 1877, de magnitud $M_s = 8.8$, en la elaboración de la carta de inundación de Iquique, es el de mayor magnitud registrado en la zona, por lo que esta investigación considera apropiado el uso del mismo evento sísmico para la estimación de los daños sobre la infraestructura. Estos datos serán utilizados en la encuesta enviada en el procedo del método Delphi.

²¹ SHOA: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada

Las investigaciones consideran que este evento tuvo un ancho de ruptura de unos 420 km aproximadamente, con un periodo de recurrencia de 121 ± 33 años (Aránguiz & Belmonte, 2012). Las características de este terremoto se detallan en la Tabla 5-2.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Energía liberada	μ	Pa	3×10^{10}
Longitud de ruptura	L	km	420
Ancho de ruptura	W	km	125 ± 10
Profundidad	H	km	10 → 50
Desplazamiento interplaca	D	m	12.7

Tabla 5-2, estimación de los parámetros sísmicos del evento de 1877.
Fuente: (Aranguiz, 2012)

5.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

Los antecedentes explicados en los capítulos anteriores entregan la información necesaria para la aplicación del método Delphi, como medio para obtener el nivel de daño más probable de la infraestructura de acuerdo a la opinión del conjunto de expertos.

La primera iteración del procedimiento aplicado, fue mediante **é** envió de un informe (anexo 9.4) que incorpora los antecedentes generales del puerto de Iquique, el escenario de terremoto seleccionado, los métodos de falla y una encuesta.

Los resultados de esta primera iteración fueron consolidados en un informe con el análisis y resultados de la encuesta; el que luego fue enviado a los expertos para sus observaciones y consideraciones, esto constituye la segunda iteración del proceso.

5.2.1 PANEL DE EXPERTOS

Para la formación del panel de experto se seleccionaron criterios generales basados en la experiencia y conocimiento del medio. Algunos de estos son enumerados a continuación:

1. El investigador debe ser Ingeniero Civil, Ingeniero Civil Oceánico, Ingeniero en construcción o una carrera afín.
2. Experiencia en obras marítimas, 10 año mínimo.
3. Académicos del área.

Se formó un panel con 10 expertos (anexo 9.2), cuyos participantes cumplen a al menos uno de estos criterios.

5.2.2 ENCUESTA

La encuesta se elaboró a partir de la entrega de los antecedentes generales del puerto de Iquique, tales como emplazamiento, morfología del lugar, tipología de la estructura, métodos de falla y clasificación de daños, como se explicó anteriormente en el capítulo 4.

Además, se indicaron las características del terremoto de 1877, como el evento seleccionado para el análisis de la vulnerabilidad estructural, con una serie de preguntas enfocadas al tipo de daño, según las 7 tipologías de falla geotécnica propuesto por la ROM, y con la tabla de graduación de daños propuestos por la EEIR²², con los 6 tramos de estado de daño, como se aprecia en la Tabla 5-3.

Nivel	Estado de daño	Descripción de daño
Ninguno	0%	Sin daño.
Ligero	0% - 5%	Daño no estructural aislado; costo de reparación menos al 5% del valor del mercado de la estructura.
Moderado	5% - 25%	Daño considerable no estructural y daño estructural ligero; costo de reparación menos al 25% del valor de mercado.
Severo	25% - 50%	Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo; Costo de reparación menor al 50% del valor de mercado.
Total	50% - 100%	Más económico demoler que reparar.
Colapso	> 100%	Colapso de la estructura.

Tabla 5-3, Tabla de graduación de daños
Fuente: (Earthquake Engineering research institute, 1996)

A partir de lo anterior se intenta establecer una relación entre la magnitud del terremoto y el nivel de daño estimado en el terminal 2 del puerto de Iquique, según las respuestas a la encuesta fue enviada vía correo electrónico a cada uno de los participantes, quedando a la disposición de tiempo del experto para la entrega de los resultados.

Los datos obtenidos a partir de la encuesta fueron consolidados de forma tal que, para cada tipo de falla geotécnica se establece un nivel de daño en términos porcentuales, determinado como el promedio del máximo valor estimado por los expertos, ponderado por el nivel de respuesta, para cada tipo de falla según tipología de muelle.

5.3 RECOPIACIÓN DE DAÑOS EN PUERTOS POR TERREMOTO

Los daños ocasionados por los terremotos han sido un factor relevante en la historia de Chile, ya que constantemente nos vemos expuestos a esta amenaza que causa diversos tipos de

²² E.E.R.I.: Earthquake Engineering research institute

daño en los puertos que, dependiendo de la magnitud, podrían tener como efectos desde la interrupción de las operaciones por periodos de tiempo prolongado hasta la pérdida de la infraestructura.

No obstante, hace falta mayor volumen de información relacionada con el nivel de daño histórico, para obtener un resultado que sea estadísticamente representativo, motivo por el cual surge este proyecto de título, sin embargo, de todas formas se considera apropiada la validación de los resultados de la aplicación del método Delphi, a partir de la consistencia de los resultados obtenidos en la investigación de Marco Saravia, quien realizó un levantamiento de la información disponible correspondiente al tipo de daño sufrido en los puertos de la octava región, ocasionados por el terremoto del año 2010, más el levantamiento de los daños sufridos por el puerto de Iquique ocasionados por el terremoto del año 2014. Es así que se cuenta con información de daños de:

- Puerto de Lirquén,
- Muelle de Penco
- Puerto de Talcahuano
- Puerto San Vicente
- Muelle ENAP
- Muelle CAP Huachipato
- Cabo Froward
- Puerto Coronel
- Puerto de Iquique

El tipo de daño registrado se utilizó en la caracterización de potenciales peligros y posible comportamiento de la estructura para eventos de similares características y así como para la validación del método Delphi.

6 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de esta investigación, correspondientes al desarrollo del método Delphi y a una consolidación del registro de daños en puertos de Chile, que servirán como insumos para la elaboración de un plan de continuidad de negocios (BCP).

6.1 MÉTODO DELPHI

Es procedimiento fue realizado de acuerdo a lo señalado en el capítulo 5.2. El primer paso se realizó mediante el envío de una encuesta al panel de expertos.

Los antecedentes recopilados fueron analizados y consolidados en gráficos que muestran la relación entre la estimación del nivel de daño estructural considerada por el conjunto de expertos, y la tipología de falla, para el terremoto seleccionado (Iquique 1877, $M_s = 8.8$). Estos resultados se muestran en los capítulos siguientes.

6.1.1 SITIO 3

La obtención del nivel de daño para el sitio 3 fue realizado en base a las respuestas entregadas por el grupo de expertos, donde la distribución del nivel de daño según el tipo de falla se muestra en la Tabla 6-1.

	Ninguno	Ligero	Moderado	Severo	Total	Colapso
	0%	0%-5%	5%-25%	25%-50%	50%-100%	100%
Deslizamiento en el contacto hormigón-blanqueta de apoyo		100%				
Deslizamiento en el contacto blanqueta-terreno natural	25%	75%				
Hundimiento	40%	20%	20%	20%		
Vuelvo plástico	40%	20%	20%	20%		
Estabilidad global		25%		75%		
Erosión interna de trasdós o del cimiento	25%		25%	50%		
Socavación	25%	25%	25%	25%		

Tabla 6-1, distribución de datos, según respuesta de experto para el sitio 3

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6-1 muestra la distribución de respuestas según el nivel de daño esperado para cada método de falla.

Considerando que la tabla de graduación de daños EERI, entrega un rango de nivel de daño estimado, se utilizó el valor máximo de daño para cada tipo de falla propuesto por cada experto para los sitios 3 y 4; este se valor se promedió para la elaboración de los gráficos 6-1 y Tabla 6-2.

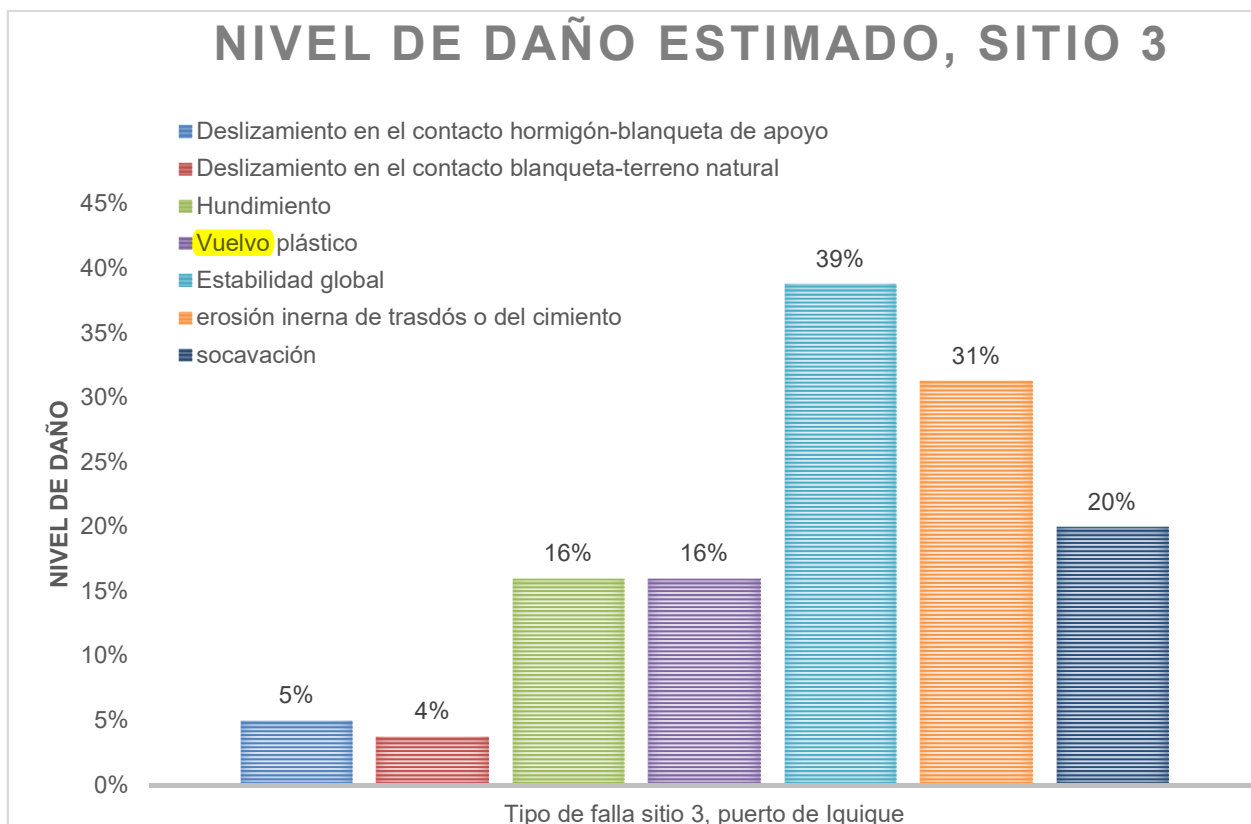


Gráfico 6-1, comportamiento porcentual estimado por los expertos para el sitio 3.
Fuente: Elaboración propia

El nivel de daño observado a partir de los datos recopilados en la encuesta muestra a dos tipos de falla con mayor índice de daño, la estabilidad global con un 39% y la erosión trasdós con un 31%, obtienen la clasificación de daño severo. Mientras que socavación (20%), hundimiento (16%) y vuelco plástico (16%) respectivamente clasifican como daño moderado. El menor índice de daño se obtuvo en el deslizamiento de hormigón/blanqueta (5%) y blanqueta/terreno-natural (4%), considerado como daño ligero

6.1.2 SITIO 4

Para el sitio 4 se utilizó el procedimiento anteriormente utilizado en el sitio 3, como se muestra en la Tabla 6-2.

	Ninguno	Ligero	Moderado	Severo	Total	Colapso
	0%	0%-5%	5%-25%	25%-50%	50%-100%	100%
Hundimiento o arranque de los pilotes		100%				
Rotura horizontal del terreno		100%				
Erosión del talud			40%	60%		
Deslizamiento superficial			75%	25%		
Equilibrio global			60%	40%		
Erosiones internas y arrastres		75%	25%			
Socavación		50%	50%			

Tabla 6-2, comportamiento porcentual estimado por los expertos para el sitio 4
Fuente: Elaboración propia.

De los resultados apreciados en el grafico 6-2, se muestran tres tipos de fallas consideradas como daño severo: erosión del talud (40%), deslizamiento superficial (31%) y equilibrio global (35%); mientras que el nivel de daño por socavación (15%) y erosiones internas/arrastres (10%) son catalogadas como daño moderado. Con un 5% de nivel de daño está el hundimiento o arranque de pilotes y la rotura horizontal del terreno, daño catalogado como ligero.

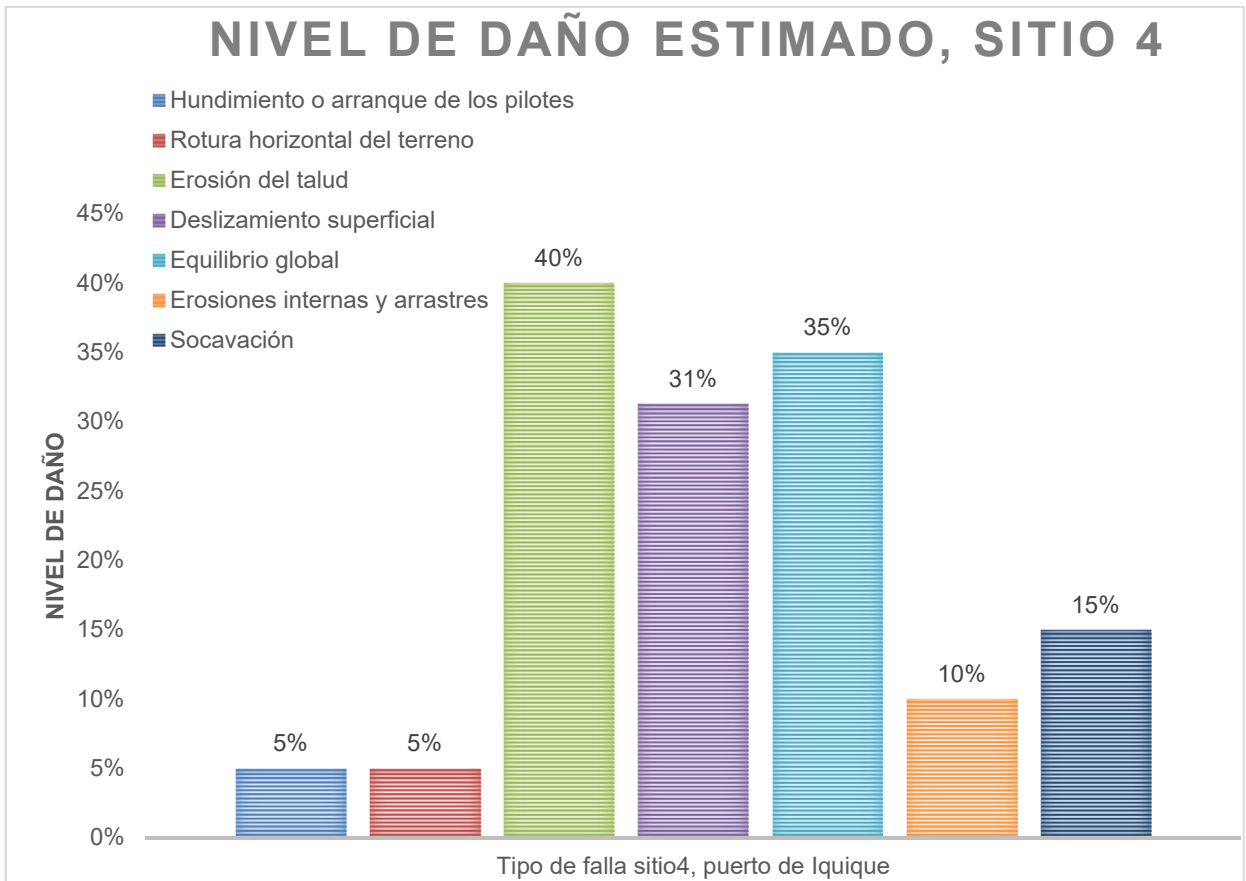


Gráfico 6-2, Comportamiento porcentual estimado por los expertos para el sitio 4.
Fuente: Elaboración propia

6.1.3 EFECTOS DE LICUEFACCIÓN

El nivel de daño que podría tener la estructura por los efectos de licuefacción no fue posible estimarlo, ya que debido a la poca información obtenida del área de estudio relacionada con el tipo y composición del suelo, los participantes optaron por no responder directamente la pregunta, al considerar que los antecedentes aportados a la investigación no son concluyentes, así como también, considerando la experiencia y el conocimiento que tienen de la zona, ya que consideran que el suelo existente no es potencialmente licuable.

Sin perjuicio de lo anterior, un experto señaló que de existir licuefacción en la zona, esta afectaría de mayor forma al sitio 3, ya que a pesar de ser reforzado mediante tensores, es más vulnerable a los efectos del suelo, como fallas por estabilidad global o erosión interna, producto de la pérdida de soporte. Mientras que en el sitio 4, señala el experto, los pilotes se encuentran hincados en roca, por lo que disminuye la probabilidad causar daño por licuefacción.

6.1.4 EFECTOS DEL TSUNAMI

Al igual que el caso de licuefacción, los expertos concuerdan que en relación al caso de la generación de un tsunami, dada la morfología del lugar y la configuración del puerto, el terminal 1 actuaría como una barrera de disipación de energía, otorgando una protección al terminal 2, disminuyendo así el impacto del tsunami sobre los sitios 3 y 4, como lo que ocurrió con el terremoto del 2014, el cual generó un tsunami menor, con altura de ola de 2 a 2,5 [m] (EPI, 2014), que no causó daños en el terminal 2.

Bajo estas consideraciones, no es posible estimar el comportamiento de la estructura, debido a que la magnitud del sismo entregado, no tiene, necesariamente, directa relación con la forma que se pudiese generar un tsunami. Para una estimación más certera, es necesario recurrir a modelos numéricos o físicos.

6.2 ANÁLISIS DE DAÑOS REGISTRADOS EN ESTRUCTURAS PORTUARIAS.

Los resultados que se obtuvieron del método Delphi, sobre el comportamiento de las estructuras existentes en el sitio 3 y 4, respecto del escenario de catástrofe seleccionado, fueron contrastados con el registro histórico de daños en estructuras portuarias y consolidados en un informe enviado a los expertos, de lo cual es posible inferir en lo siguiente:

El nivel de daños para el sitio 3, correspondería principalmente a los problemas de falla de la estabilidad global, erosión interna trasdós y socavación, ya que al ser una estructura de gran inercia, genera una gran resistencia que limita las deformaciones, sin embargo, los efectos de

asentamiento de sus capas granulares podrían provocar fallas estructurales que impidan la operación de transferencia de carga.

Considerando además la existencia de un tensor de refuerzo asísmico en los bloques, es posible que, por efecto del sismo, exista una disminución en la tensión del tensor, por lo que tendría que ser periódicamente controlado, ya que si la tensión no es la adecuada al momento de la solicitación, esta podría perder en parte su capacidad de resistencia sísmica.

En comparación a los daños observados en la recopilación de antecedentes históricos, es posible ver efectos similares a los detectados por los expertos, donde la capacidad portante del suelo para este tipo de fenómenos es la principal amenaza a la estabilidad de la estructura del tipo de cajón de hormigón. Esto se ve reafirmado por los antecedentes obtenidos del terremoto del año 2014, donde este sitio no sufrió problemas de desplazamiento de los bloques de hormigón, pero sí tuvo problemas de erosión que provocaron socavación de algunos sectores de la explanada, que determinaron limitar ciertas operaciones portuarias y clausurar otras, como lo que sucedió con el terminal 1 del puerto de Iquique, que formando parte del mismo puerto, el comportamiento fue totalmente diferente, ya que sufrió daños principalmente en el molo de abrigo, como se observan en la Figura 6-1.

Cuadro N° 1.- Resumen de daños del Molo de Abrigo el Puerto de Iquique

OBRA	SECTOR	ZONA	DAÑOS	MAGNITUD	OBSERVACIONES
MURO ROMPEOLAS		A	No		Daños leves, se observan fisuras en sector C y algún grado de desalineamiento en zona central (B). Se estima que no reviste riesgos.
		B	DA	Leve	
		C	F	Leve	
CABEZAL			F+G	Muy grave	Grieta expuesta al mar que drena el relleno, perdiendo su condición. Riesgo de colapso
MURO NORTE			I+DN+F+G	Muy grave	Sector colapsado, en continuo deterioro por acción del oleaje en grietas
MURO FRENTE DE ATRAQUE		A	No		Presenta una situación distinta según tramo, sin daño aparente entre las bitas 18 y 10, para luego registrar daños graduales hasta el límite del colapso en su extremo, en Bita 1
		B	DA+I+DN+F	Mediano	
		C	DA+I+DN+G+F	Grave	
		Zona pesqueros	No		
PUENTE DE ACCESO			DN+G	Mediano	Se estima un uso con restricciones. Solo para vehículos livianos
EXPLANADAS	A	1	DN+G	Leves	Situación variable según tramo, con sectores colapsados
		2	DN+G	Mediano	
		3	DN+G	Muy grave	
	B	1	DN+G	Mediano	Situación variable según tramo, con sectores colapsados
		2	DN+G	Grave	
		3	DN+G	Muy grave	
	C	1	DN+G	Mediano	Situación variable según tramo, con sectores colapsados
		2	DN+G	Grave	
		3	DN+G	Muy grave	
DA= Desalineamiento I = Inclinación DN = Desniveles F= Fisuras G= Grietas					

Figura 6-1, Resumen de daños del molo de abrigo, Puerto de Iquique.
Fuente: (EPI, 2014)

Los daños observados son de distinta magnitud, dependiendo del estado de mantención que se encontraba la estructura al momento del sismo. En algunos casos podemos ver la destrucción total de un frente de atraque, como la observada en el puerto de Talcahuano, donde el tablestacado sufrió un asentamiento en dirección al mar, generando subsidencias en la explanada y pavimentos existentes, como se observa en la Figura 6-2.



Figura 6-2, daños en el puerto de Talcahuano
Fuente: (Saravia, 2017)

Respecto al sitio 4, este sitio se diseñó y reforzó con aislamiento sísmico bajo las consideraciones actuales de espectros de aceleraciones, como se puede apreciar en la Figura 6-3, espectro de demanda sísmica utilizado para el diseño de la extensión del sitio 4 Fuente: Figura 6-3, que utilizó una probabilidad de excedencia del 2% en una vida útil de 50 años (PRDW Aldunate Vásquez, 2008).

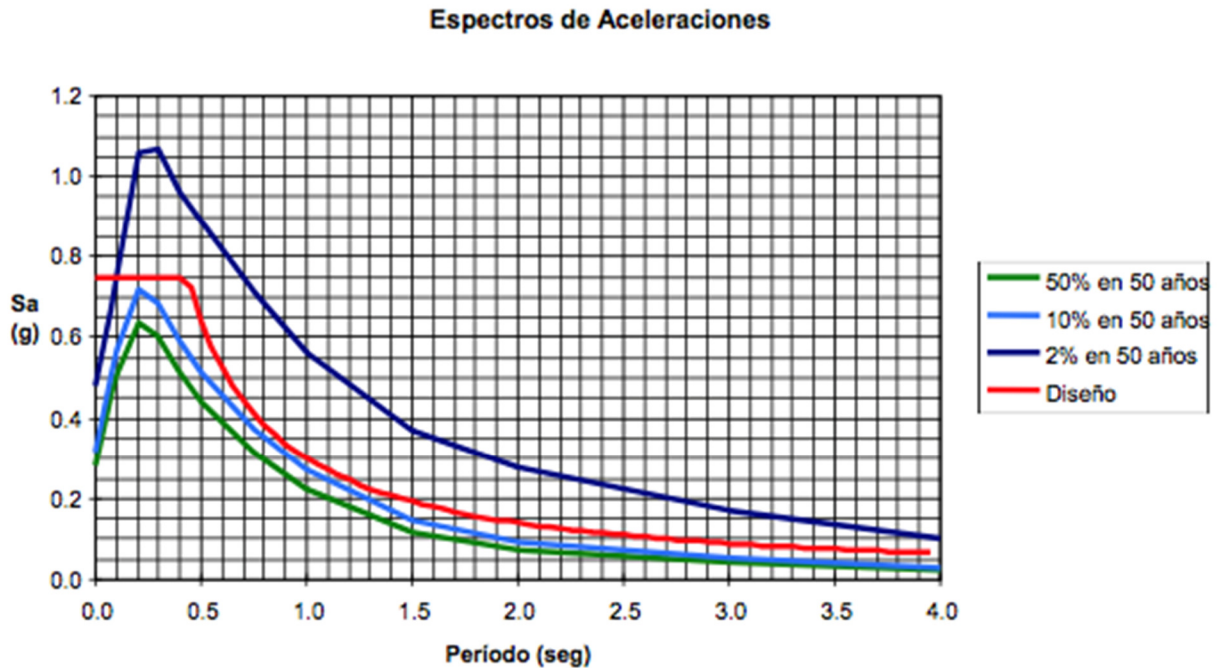


Figura 6-3, espectro de demanda sísmica utilizado para el diseño de la extensión del sitio 4
Fuente: (PRDW Aldunate Vásquez, 2008)

Como se comentó anteriormente, dentro de los daños sufridos en el puerto de Iquique durante el terremoto del año 2014, $M_w = 8.2$ (EPI, 2014), el sitio 4 no sufrió daños, de acuerdo a lo señalado en el capítulo 4.2, lo que le permitió volver a operar 48 horas después del terremoto.

El puerto de Coronel es un terminal que al igual que el sitio 4, es de pilotes y cuenta con refuerzo sísmico, sin embargo sufrió daños por los efectos del terremoto del año 2010, que debido al tipo de suelo, se observaron los efectos de licuefacción, esto provocó una falla conjunta que desplazó los pilotes, induciendo asentamiento de pilotes y pavimentos, desprendimiento de uniones viga-pilotes, como se observa en la Figura 6-4, que sin embargo no impidieron que el puerto continuara operando post-terremoto. (González & Verdugo, 2012)

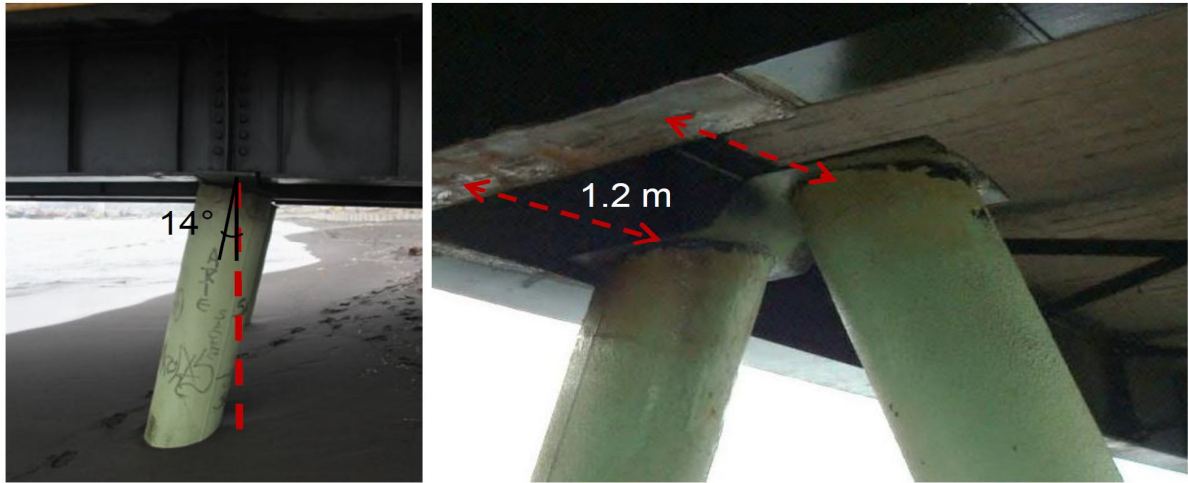


Figura 6-4, daños en puerto de Coronel
Fuente: (González & Verdugo, 2012)

Debido a las características y nivel de los daños observados tanto en el análisis Delphi como del análisis histórico, podemos ver ciertas similitudes en el nivel y tipo de daño, siendo el de clasificación SEVERO, el que más podría tener perjuicios para la operatividad del puerto.

6.3 PLAN DE CONTINUIDAD DE NEGOCIOS

Esta investigación busca generar una metodología para análisis de riesgo. La motivación, u objetivo final, es que sirva como insumo en un procedimiento de elaboración de un plan de continuidad de negocios (BCP), para reducir el riesgo de que las operaciones portuarias del puerto de Iquique queden paralizadas durante un periodo de tiempo prolongado. Para esto se establecen lineamientos generales utilizando los resultados obtenidos en el análisis de riesgos realizado en este proyecto, con tal de disminuir la vulnerabilidad, desde el punto de vista estructural/operacional, que se tiene frente a un escenario de desastre, como es el caso de un terremoto.

Los potenciales daños estimados por el método delphi permiten clasificar el nivel de daño y, en consecuencia, ayuda a tomar la decisión de dónde focalizar los recursos para la implementación de alguna medida de ingeniería, de carácter temporal o permanente, ya sea de manera preventiva o correctiva, que conlleve en la disminución de la vulnerabilidad física del terminal 2. El daño probable se refiere a la probabilidad obtenida del Delphi, por ejemplo, para el sitio 3, el volcamiento del muro de bloques de hormigón (39%), como se muestra en la Tabla 6-3, fragilidad de los recursos que presenta una caracterización de la fragilidad de los recursos ante un evento de terremoto.

Evento: Terremoto $M_s = 8.8$					
Recurso	Nivel de daño	Daño probable	Medida correctiva	Medida preventiva	PTR
Sitio 3	Estabilidad global, Severo	Volcamiento del muro de bloques de hormigón (39%)	Reconstrucción y reforzamiento de la blanqueta.	Verificar el estado de tensión de los anclajes sísmicos	55 días
Sitio 3	Erosión interna de trasdós, Severo	Asentamiento de la superficie (31%)	Relleno y reparación de la explanada.	Inspección y reparación de socavaciones bajo el pavimento. compactación dinámica de	30 días
Sitio 4	Erosión de talud, Severo	Perdida de calado de operación, Volcamiento del muro de bloques de hormigón (40%)	Reconstrucción y reforzamiento del talud.	Verificar el estado del talud, reformar mediante el uso de geocolchón.	90 días
Sitio 4	Equilibrio global, Severo	Volcamiento del muro de bloques de hormigón (35%)	Compactación dinámica de la explanada, reforzamiento de talud.	Inyección de anclajes sísmicos, similar al sitio 3	70 días
Sitio 4	Deslizamiento superficial, Severo	Asentamiento de la superficie (31%)	Reconstrucción y reforzamiento del talud.	Diseño y fabricación de paneles que funcionen como nivelador de la superficie.	60 días

Tabla 6-3, fragilidad de los recursos
Fuente: Elaboración propia

Se puede entender medida correctiva como aquella destinada a solucionar el daño estimado; en este sentido la verificación del estado de tensión en de los anclajes sería parte de una medida preventiva para validar el riesgo obtenido. Una medida correctiva sería la acción que se llevaría a cabo si es que efectivamente ocurre un volcamiento del muro que conlleve a la contratación de una empresa de construcción de obras marítimas para realizar las reparaciones.

A partir del análisis que se haga, como el ejemplo mostrado en la tabla 6-3, se debe generar el plan específico que relacione las actividades de mitigación preventiva, asignando recursos, fechas y responsables específicos; asimismo, el plan debe incorporar la identificación de las actividades necesarias para llevar a cabo las actividades correctivas, incluyendo la identificación de las fuentes de financiamiento, para cumplir con el objetivo de acelerar el proceso de toma de decisiones posteriores a la ocurrencia del desastre.

Los valores entregados en el tiempo estimado de recuperación se estimaron a priori para destacar la importancia de hacer el análisis de comparación de (PRT) y los costos de reparación/reconstrucción en el proceso de toma de decisión de la implementación de medidas preventivas. Lo anterior está enfocado netamente al funcionamiento y disminución de la vulnerabilidad estructural, ya que además es necesario considerar los aspectos operacionales y la normativa vigente.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta investigación entrega una metodología para la generación de información relevante para el proceso de análisis de riesgos, a partir de la información entregada a un conjunto de expertos, donde es posible estimar el nivel de daño generado al puerto de Iquique, ante un escenario de terremoto de similares características del ocurrido el 9 de Julio de 1877, de magnitud $M_s = 8.8$. Del proceso de investigación se desprende lo siguiente:

1. La caracterización de la vulnerabilidad a partir del tipo de falla propuesto por la ROM según de la tipología estructural existente en los sitios 3 y 4 del puerto de Iquique, es un buen mecanismo para la estimación del comportamiento de la estructura tipo.
2. El método Delphi es un procedimiento aceptable para la estimación del nivel de daño para los sitios 3 y 4, ya que los resultados obtenidos tienen similitud con los daños observados con el terremoto del 2014, (anexo 9.6).
3. Se observaron daños de similares características al estimado para el sitio 3 (daño severo), pero de distinta magnitud, como el que se encontró en el puerto de Talcahuano, que tuvo un colapso de un frente de atraque producto de la falta de sustentación del suelo, lo que generó una falla de estabilidad global.
4. Los efectos de la licuefacción en la infraestructura no fueron posible de estimar, debido principalmente a la poca información referente a la clasificación del tipo de suelo predominante en la zona.
5. La estimación de los daños que produce un tsunami no fue considerada, debido a que los antecedentes sísmicos entregados al conjunto de expertos, no permiten estimar la magnitud del tsunami y los sus efectos sobre la infraestructura.

La metodología propuesta es pionera en esta área y genera los primeros precedentes en Chile para la estimación de daños por intermedio de un método cualitativo, que tiene la ventaja usar una menor cantidad de recursos que los métodos tradicionales (físicos - cuantitativos), que si bien son más precisos, requieren de una mayor cantidad de recursos y tiempo para la ejecución.

Actualmente los estándares de la gestión de riesgos exigen precisión de las respuestas frente a un terremoto, por lo cual se deben establecer canales de retroalimentación y procesos de autoevaluación para afrontar una situación compleja, por lo cual es fundamental conocer el estado actual del terminal, se recomienda; realizar un levantamiento, digitalización y respaldo de la información estructural existente, tales como planos, planos as-built, memorias de cálculo, modificaciones o reparaciones que se le hayan realizado al muelle, batimetrías, actualización del inventario de mantenimiento de muelle y sus partes necesarias para el atraque, como bitas, defensas de los sitios, elementos de atraque, seguridad, etc. Una vez conocido el estado actual del terminal, se debe determinar si la información recopilada es suficiente, o si se deben realizar estudios que actualicen la base de datos que ayuden a establecer las condiciones mínimas que deben estar para asegurar una operatividad segura.

Dado lo anterior, sería interesante establecer un canal abierto con los responsables de la gestión y respuesta de ITI ante una catástrofe, para así lograr mejoras en los procesos de respuesta y recuperación.

Este proceso determina el nivel y el tipo de daño estructural que puede presentar la infraestructura, por lo cual ayuda a focalizar los recursos disponibles, y de esta manera, entrega un escenario de desastre, ante el cual se evalúa el costo que tiene para la organización las medidas de prevención/mitigación en relación a la interrupción de sus operaciones y la posible pérdida de infraestructura.

El uso de esta metodología de forma confiable para una futura investigación referente a los efectos que no fueron posible estimar como licuefacción y tsunamis, para lo cual se recomienda contar con la información actualizada del estado del sitio, el tipo y la clasificación del suelo existente, con la finalidad de entregar la mayor cantidad de antecedentes al conjunto de expertos, para obtener una mayor precisión en el comportamiento y los efectos sobre la estructura.

8 REFERENCIAS

- Aranguiz, R. B. (2012). *Efectos en la bahía de concepcion de un tsunami generado en el norte de Chile*. Concepcion .
- Aránguiz, R., & Belmonte, A. (2012). *Efectos en la bahía de Concepción de un tsunami generado en el norte de Chile*. Concepción: Departamento de ingeniería civil, Universidad Católica de la Ssma Concepción.
- Brunet, S. (2012). *Comportamiento sísmico de estructuras de puerto*.
- Cardona, O. (2003). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo*. Bogota.
- Caselli, F., Beale, M., & Reyes, M. (2014). *Impact of the recent earthquake and tsunami on Chilean port*. Laiden, Países Bajos: CRC Press.
- Caselli, F., Reyes, M., Beale, M., Akakura, Y., & Ono, K. (2016). Methodology and procedure of business impact analysis for improving port logistics business continuity management. *Journal of integrated disaster risk management*.
- CSN. (s/f). *Sismicidad y terremotos en Chile*. Recuperado el 07 de 2015, de <http://www.sismologia.cl/>
- Departamento de desarrollo regional y medio ambiente. (1991). *Desastres, planificación y desarrollo: Manejo de amenazas natarules para reducir los daños*. Washington D.C.
- DIRPLAN, MOP. (2010). *Impacto en la competitividad, uso de suelo y en la calidad de vida urbana*.
- Earthquake Engeneering research institute. (1996). *Tabla de graduacion de daños*.
- EPI. (2014). *Experiencia y efectos del terremoto y tsunami 2014 en Iquique, región de Tarapacá*. Iquique: epi.
- Freeman, P. M.-B. (2009). *Gestión de riesgo de desastres naturales*.
- GEOVENOR Ingenieros Consultores. (2010). *Refuerzo asismico sitio 3. Puerto de Iquique*.
- González, J., & Verdugo, R. (2012). *Efectos del terremoto del 27F en el subsuelo del puerto de Coronel*. Coronel.
- Gorge, M. (2006). Crisis management best practice - here do we start from? *Computer Fraud & Security*, 10-14.
- Gutiérrez, I. (s/f). *RUTAGEOLOGICA*. Obtenido de www.rutageologica.cl: http://www.rutageologica.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=383&Itemid=88&showall=1

- Hernández, L. (16 de 05 de 2011). *http://www.cienciaonline.com*. Obtenido de <http://www.cienciaonline.com/2011/05/16/terremotos-de-4-5-y-5-1-en-la-escala%E2%80%A6-%C2%BFrichter/>
- Hidalgo, P. (2012). Diseño sísmico de obras portuarias., (pág. 2).
- Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. (2016). *http://www.igepn.edu.ec/resumen-del-proyecto-tsunamis*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/resumen-del-proyecto-tsunamis>
- KUMAGAI, K. (2011). *Tsunami-induced debris of freight containers due to 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake*. Kanawaga.
- Lagos, M. (2000). Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 93-102.
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Revista Geológica de Chile*.
- Lomnitz, C. (2004). *Major earthquakes of Chile: A historical survey, 1535-1960*. Ciudad de Mexico.
- ONEMI. (s/f). *http://www.onemi.cl/*. Recuperado el Julio de 2015
- PIANC. (2001). *Seismic desing guidelines for port structures*. .
- PRDW Aldunate Vásquez. (2008). *Extensión sitio 4*.
- Puertos del Estado. (2005). *Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias, ROM 0.5-05*. España: Puertos del Estado.
- Riddell, R. (2011). *¿El espectro de diseño de la norma sísmica Chilena es suficiente?*
- Ruiz, S., Metois, M., Grandin, R., Rivera, R., Leon, S., Cararo, S., . . . Campos, J. (2015). *Los terremotos de Iquique 2014*.
- SANS Institute. (2002). *Introduction to Business Continuity Planning*. Watchfire.
- Saravia, M. (2017). *Análisis de riesgos infraestructurales en el puerto de Iquique ante eventos de terremoto y tsunami*. Valparaíso.
- SATREPS Chile Working Group 4b. (2014). *BCP Guidelines for Chilean ports*. Valparaíso: SATREPS.
- Turoff, M. H. (2013). *Multiple perspectives on planning for emergencies: An introduction to the special issue on planning and foresight for emergency preparedness and management*. Elsevier.

9 ANEXOS

9.1 ANEXO CARTA DE INUNDACION DE IQUIQUE MEMORIA EXPLICATIVA

MEMORIA EXPLICATIVA CARTA DE INUNDACIÓN POR TSUNAMIS DE IQUIQUE

INTRODUCCIÓN

Las características físicas naturales del territorio donde se emplaza la ciudad de Iquique, sumado a la densidad poblacional y uso de su borde costero, plantean la necesidad de evaluar adecuadamente el riesgo de tsunami al que se encuentra sometida.

Por lo anterior, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), ha elaborado una carta que define las áreas que potencialmente podrían inundarse en caso que ocurriera un tsunami de gran tamaño. Dicha información se obtuvo mediante la aplicación de una metodología de simulación numérica, considerada hoy como *una de las técnicas más confiables para el estudio de estos fenómenos* (Wong et al., 2006). Este método utiliza básicamente datos topográficos y batimétricos junto con información sísmica, todo ello integrado a un modelo numérico de simulación que se resuelve mediante computadores.

TSUNAMIS HISTÓRICOS EN IQUIQUE

Históricamente, se conoce la ocurrencia de dos terremotos que generaron tsunamis en esta zona de Chile. Estos son los registrados el: 13 de agosto de 1868 y 9 de mayo de 1877, siendo el de 1877 el de mayor magnitud conocida y del cual se tienen registros históricos de un tsunami destructivo.

CARTA DE INUNDACION DE IQUIQUE

La presente edición de la Carta de Inundación por Tsunami de la ciudad de Iquique, se elaboró utilizando el modelo de simulación numérica COMCOT. Este modelo fue alimentado con la información topográfica, batimétrica y del plano urbano más actualizado disponible. Además, se consideró el máximo nivel del mar pronosticado. La inundación modelada se representa en rangos de profundidad de inundación en metros, *determinados en base a parámetros ingenieriles japoneses de diseño de estructuras resistentes a tsunamis* (Shuto et al., 1992).

Los parámetros sísmicos utilizados en el modelo fueron los estimados para el terremoto de 1877.

Referencias:

- Wong, F. L., Venturato A.J. & Geist, E.L., 2006. Seaside, Oregon, tsunami pilot study- Modernization of FEMA flood hazard maps: GIS Data: U.S. Geological Survey.
- Shuto, N., 1992. "Tsunami intensity and damage".

NOTA IMPORTANTE: En el caso de ocurrir un tsunami real, los niveles de inundación señalados por esta carta podrían ser diferentes, dependiendo de las características del terremoto que lo genere. Esta carta se basa en un modelo numérico, es decir, en una representación de la realidad en base a cálculos matemáticos.

Figura 9-1, extracto de carta de inundación.
Fuente: SHOA

9.2 ANEXO **PANEL DE EXPERTOS**

INFORMACION DE LOS PARTICIPANTES

Criterios de selección del panel de expertos

1. El investigador debe ser Ingeniero Civil, Ingeniero Civil Oceánico, Ingeniero en construcción o una carrera afín.
2. Experiencia en obras marítimas, 10 año mínimo.
3. Académicos del área.

Nombre	Empresa	Cargo
Juan Barboza	EPI	Subgerente de ingeniería y proyectos
Blasco Ruiz	SAAM	Jefe de Proyectos de Infraestructura Portuaria
Raúl Oberreuter	MOP	Inspector Fiscal de Consultoría en Ministerio de Obras Públicas
Julio Pérez Rubio	MOP	Director regional Valparaíso
Marco Araneda Santander	MOP	Director regional Concepción
Jaime Serrano Carvajal	IPS	Director Área Marítimo Portuaria
Luis Arancibia	Arancibia Ingeniería	Ingeniero Consultor
Claudio Hernández	GHD	Ingeniero Consultor
Patricio Winckler	UV	Académico
Mauricio Reyes	UV	Académico

9.3 ANEXO ESTIMACION DE DAÑOS

TABLA DE ESTADOS DE DAÑO

Propuesta de la escala de daño por la EERI

La EERI (Earthquake Engineering Research Institute, con sede en Oakland, California), propone una guía para evaluar el daño que pueden sufrir diferentes clases de edificios después de un terremoto. Para la EERI el daño se debe documentar de una manera detallada para todos los edificios, incluyendo edificios de un mismo tipo y tamaño ya que estos no necesariamente se comportan de la misma forma ante un terremoto. Propone, además, realizar un levantamiento en donde se incluyan los edificios dañados, así como los no dañados (EERI, 1996). Los niveles de daño propuestos en esta guía se pueden ver en la Tabla C-1, junto con el porcentaje de daño y la definición de cada nivel.

Nivel	Estado de daño (%)	Definición
Ninguno	0	Sin daño.
Ligero	0 – 5	Daño no estructural aislado; costo de reparación menor al 5% del valor del mercado del edificio.
Moderado	5 – 25	Daño considerable no estructural y daño estructural ligero; costo de reparación menor al 25% del valor del mercado.
Severo	25 – 50	Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo; costo de reparación menor al 50% del valor del mercado.
Total	50 – 100	Más económico demoler que reparar.
Colapso	>100	Colapso de la estructura.

Tabla C-1. Definición de daño de acuerdo al EERI.

9.4 ANEXO

INFORME DELPHI 1

CUESTIONARIO ENVIADO A LOS PARTICIPANTES.

El siguiente cuestionario forma parte de una memoria de título de la carrera de Ingeniería Civil Oceánica, la cual tiene como objetivo cuantificar de forma cualitativa los posibles daños sobre la infraestructura portuaria del puerto de Iquique, en caso de un terremoto y posterior tsunami, como el que azotó la zona el 9 de mayo de 1877. Este evento fue utilizado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) para la elaboración de la carta de inundación.

Para la estimación de los daños, se escogió el método Delphi, que es una metodología de investigación cualitativa diseñada para identificar tendencias sobre temas complejos, a partir de la opinión de un panel de expertos. Este método tiene la ventaja de ser aplicado sin la necesidad de una representación estadística o numérica y se basa en la visión y experiencia de los expertos citados para este procedimiento.

Las estimaciones de los expertos se realizan en dos rondas anónimas, con el objetivo de tratar de conseguir consenso, pero con la máxima autonomía por parte de los participantes. Terminada cada ronda se realizará un informe que será remitido a los expertos para analizar de forma conjunta los resultados y observaciones al procedimiento.

PUERTO DE IQUIQUE

El puerto de Iquique está ubicado en la costa norte de Chile, en la región de Tarapacá. Fue construido entre los años 1928-1932 sobre la ex isla Serrano que se encuentra unida al continente a través de un molo. Las condiciones de operatividad que tiene esta zona son excepcionales gracias a las características de abrigo y condiciones climáticas, estas hicieron que en el año 2008 la transferencia de carga fuera de 3.018.361 [ton] (DIRPLAN, MOP, 2010). Hacen de este puerto un importante pilar de conectividad para Chile, Bolivia, Brasil, Paraguay y Perú. Sin embargo los últimos acontecimientos naturales (terremotos en Chile 2010 y 2014, Japón 2011 e Iquique 2014), dejan de manifiesto la necesidad de contar con un plan de continuidad de las operaciones portuarias, que incluya un análisis de riesgo y vulnerabilidad, que proporcione elementos de preparación ante una eventual interrupción de dichas operaciones, con el consecuente riesgo de pérdida de conectividad e impedimento en la entrega de apoyo logístico de emergencia que se requiere en este tipo de situaciones asociadas a desastres naturales u otras amenazas.

Como se observa en la ilustración 1, dos terminales de penetración al mar componen el puerto de Iquique. Un molo de abrigo alberga el terminal 1, este tiene dos sitios de atraque 1 - 2 y es operado por la EPI (Empresa Portuaria Iquique). Por su parte en el espigón se encuentra el terminal 2, con una estructura mixta compuesta de pilotes (sitio 4) y bloques de hormigón (sitio 3), operados por ITI (Iquique Terminal Internacional).

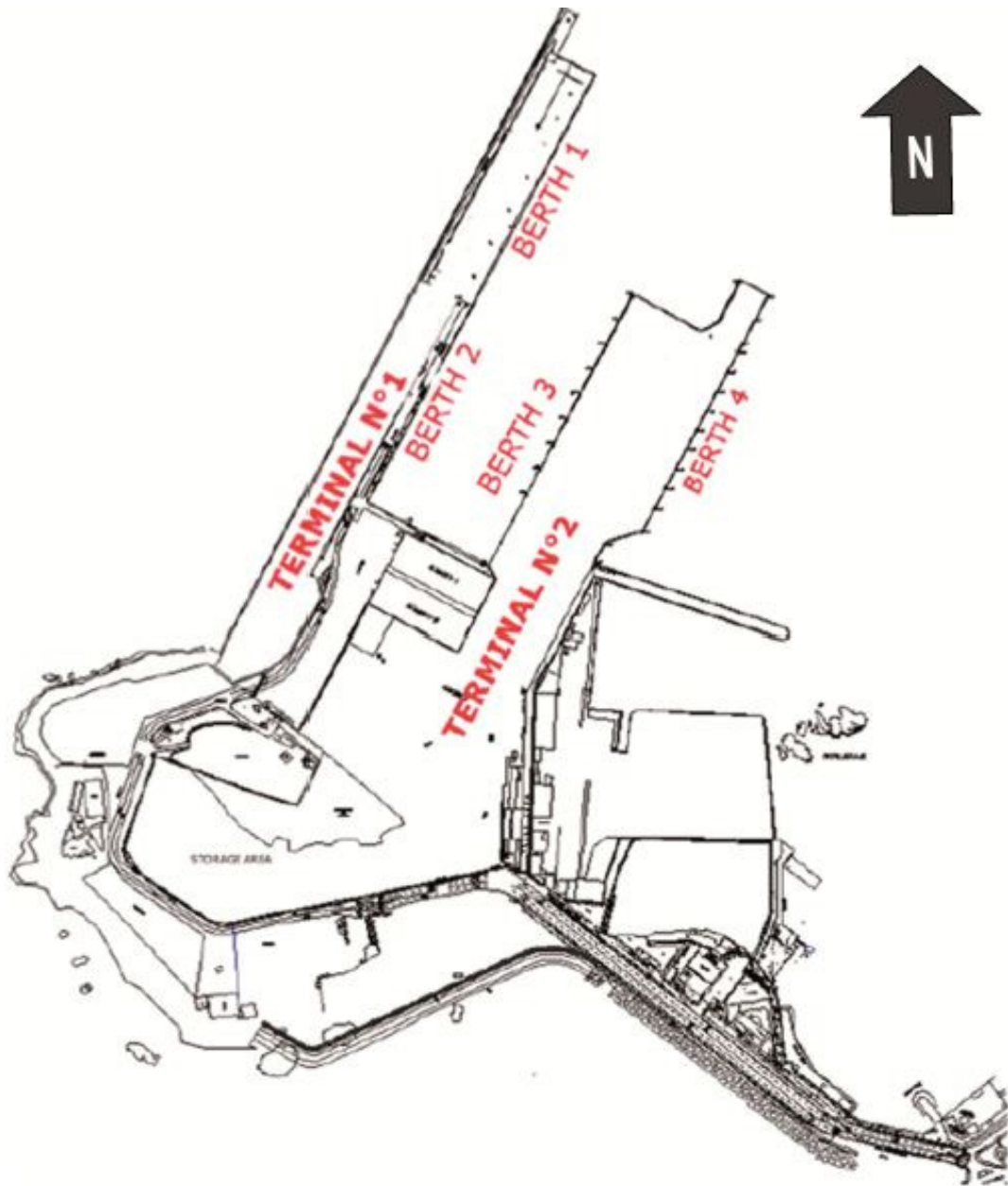


Ilustración 1, Puerto de Iquique
Fuente: (Caselli, Beale, & Reyes, 2014)

En este estudio se analizará el terminal 2, cuya estructura está compuesta por dos tipologías estructurales: bloques y pilotes.

El sitio 3, está formado por una estructura gravitacional con bloques de hormigón, como se detalla en la ilustración 2.

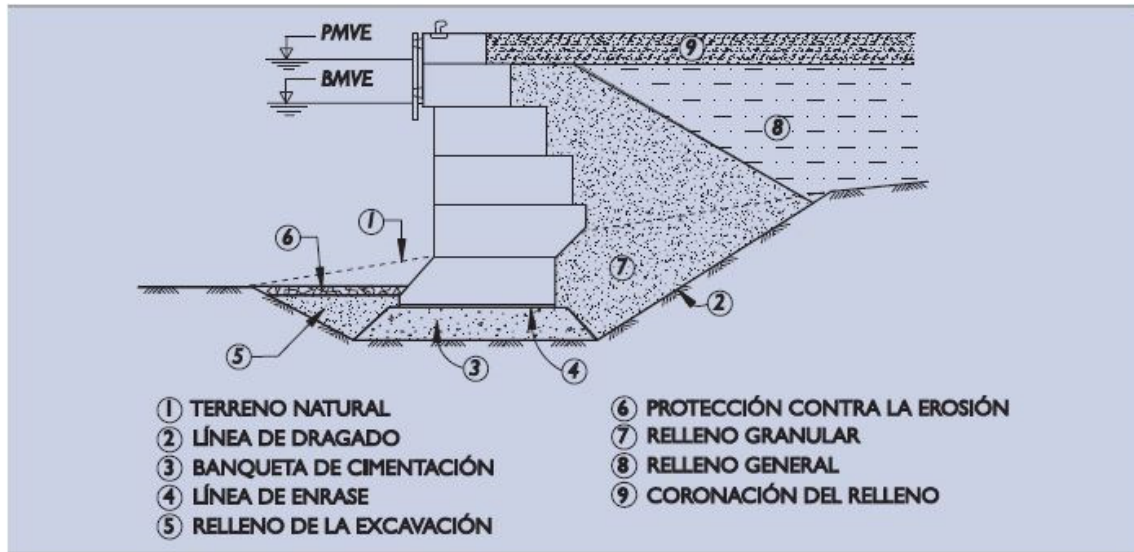


Ilustración 2, Muelle de bloques de hormigón.
Fuente: ROM

La ilustración 3 muestra los posibles tipos de falla en esta estructura.

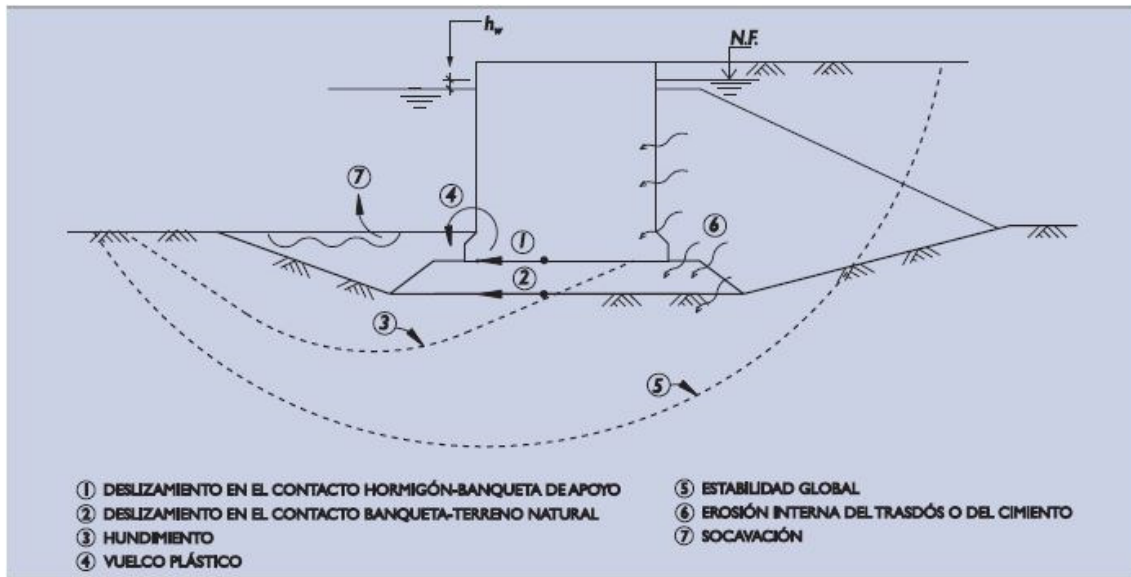


Ilustración 3, modo de fallo en muelles de gravedad.
Fuente: ROM

El sitio 4 consta de un parapeto de hormigón y una ampliación de la superficie a través de una estructura de pilotes. La estructura de pilotes está compuesta de forma genérica como se detalla en la ilustración 4.

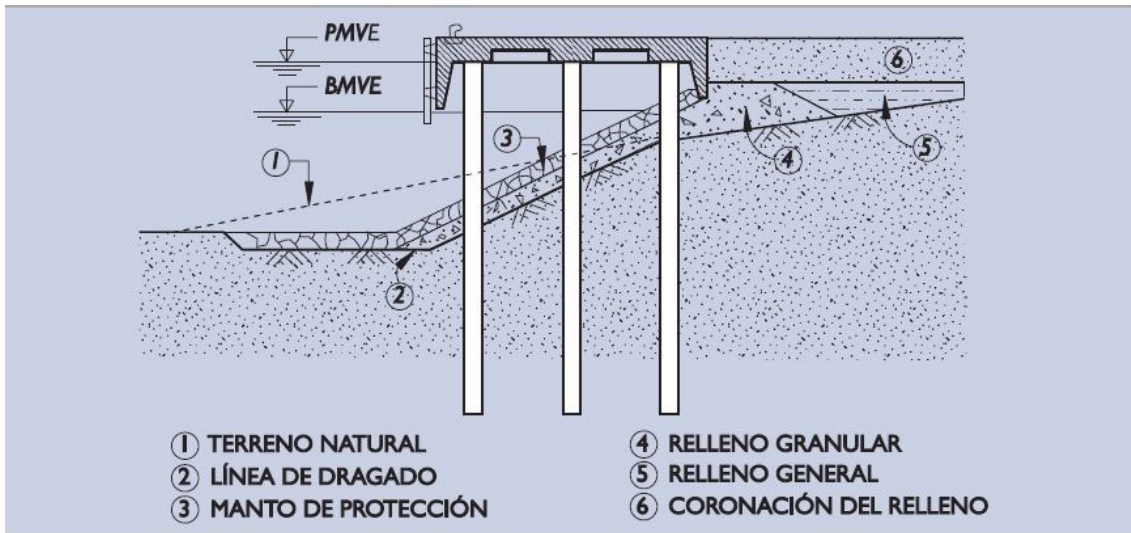


Ilustración 4, muelle de pilotes.
Fuente: ROM

Al igual que en caso anterior, se puede identificar los posibles tipos de fallas geotécnicas que pudiese tener este tipo de estructuras y son detalladas a continuación.

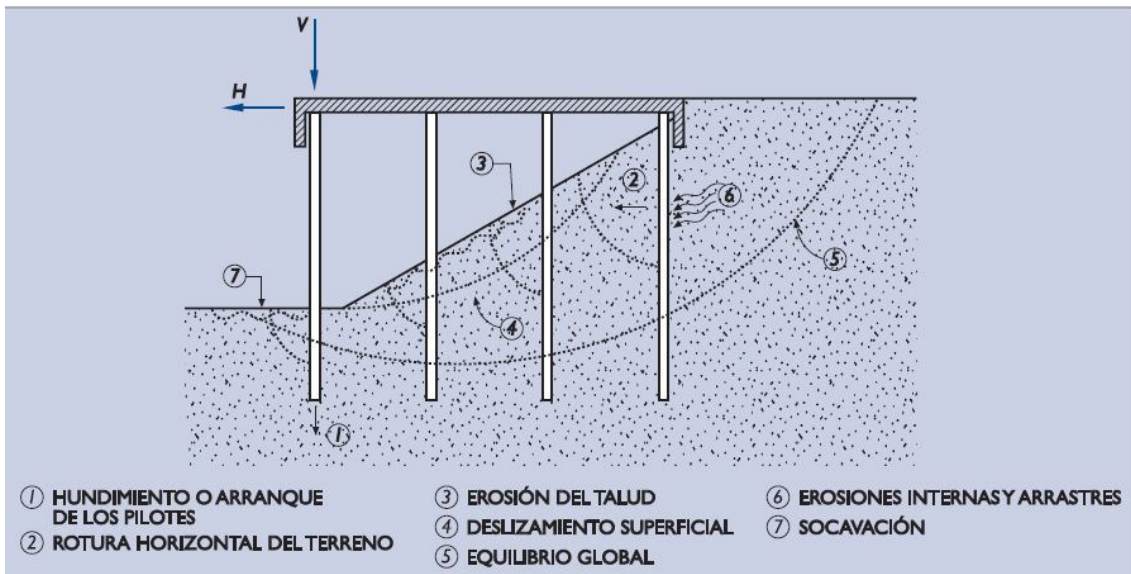


Ilustración 5, modos de fallo geotécnico en muelles de pilote.
Fuente: ROM

Las dimensiones físicas, características estructurales de estos sitios se detallan en la tabla 1.

Características del sitio

Frente		Sitios			Calados		Explanadas de apoyo		Grúas		Obs	
Nombre	N°	Longitud	Sitios	Longitud	Bitas	Permitido	Referente	Área	Superficie	Tipo		N°
		m	N°	m	N°	m	Bitas N°		m ²			
Espigón ITI	2	335 + 280	3	335	19+30	9,3	21 a 30	16.500	Pavimento de hormigón y adocretos	Si	1	Grúa Gottwald
			4	280	31+40	9,1	37 a 39	14.000		Si	1	

Tabla, dimensiones y características de los sitios de atraque.

Fuente: Puerto de Iquique

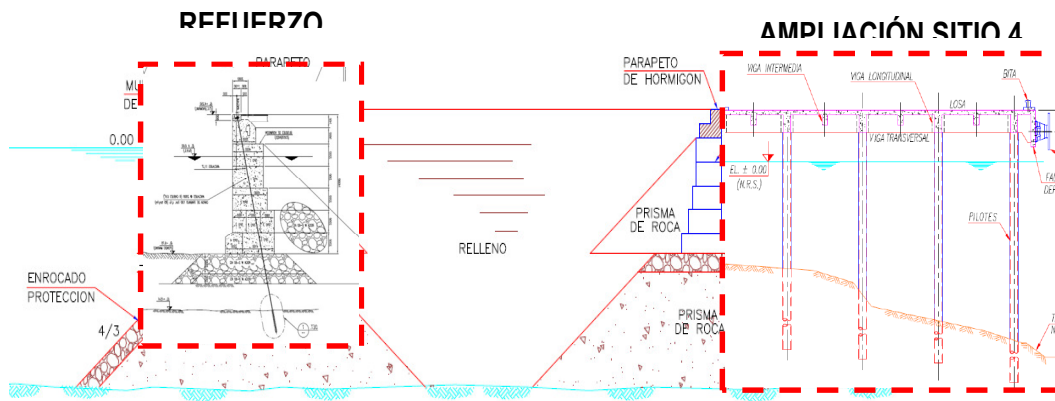


Ilustración 6, Tipología terminal 2

Fuente: ITI

Objetivo del estudio

- Cuantificar de forma cualitativa los posibles daños que pudiese tener la infraestructura portuaria del puerto de Iquique, en caso de un terremoto y posterior tsunami.

Aspectos del método Delphi

Para la confección del cuestionario se consideraron los posibles tipos de fallas que hace mención los manuales de obras costeras.

Primera iteración:

Esta etapa comprende la parte más extensa del procedimiento, debido a que se abordarán preguntas que serán la base de esta investigación. Esta está separada en las tres causales de desastres naturales que pudiesen afectar la estructura como terremoto, licuefacción y tsunami

La primera y segunda parte trata sobre el nivel de daños que pudiese causar en la estructura un terremoto y la licuefacción del suelo respectivamente, con las características que se detallan en el cuestionario, del terremoto ocurrido en 1877.

Se utilizará la tabla de graduación de estimación de daño diseñada por la EEIR (Earthquake Engeneering Research Institute), para cuantificar el nivel daño que pudiese sufrir la estructura, respecto a los posibles tipos de falla que propone la ROM (Recomendaciones para obras marítimas).

La tercera parte corresponde a una pregunta abierta que tiene como objetivo la proposición del experto, en base a su experiencia, sobre el comportamiento de la estructura luego de un tsunami.

Efectos del terremoto en la infraestructura portuaria.

En esta etapa es necesario contestar a partir de la información que se entrega a continuación.

- El terremoto tiene las siguientes características:

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Magnitud de momento	M_w		8.8
Energía liberada	μ	Pa	3×10^{10}
Longitud de ruptura	L	Km	420
Ancho de ruptura	W	Km	125 ± 10
Profundidad	H	km	10 → 50
Desplazamiento interplaca	D	m	12.7

Tabla, estimación de los parámetros sísmicos del evento de 1877.

Fuente: (Aranguiz, 2012)

- Tabla de graduación de estimación de daño

Nivel	Estado de daño	Definición Terremoto
Ninguno	0%	Sin daño.
Ligero	0% - 5%	Daño no estructural aislado; costo de reparación menos al 5% del valor del mercado de la estructura.
Moderado	5% - 25%	Daño considerable no estructural y daño estructural ligero; costo de reparación menos al 25% del valor de mercado.
Severo	25% - 50%	Daño estructural considerable y daño no estructural excesivo; Costo de reparación menor al 50% del valor de mercado.
Total	50% - 100%	Más económico demoler que reparar.
Colapso	> 100%	Colapso de la estructura.

- Considerando las características del sismo de 1877, ¿sería posible señalar el nivel de daño que pudiese sufrir la estructura?

Sitio 3	
Si	No

Sitio 4	
Si	No

II. De ser afirmativa la respuesta anterior, ¿qué tipo de falla pudiese ocurrir?

Sitio 3		
n°	Tipo de falla	Nivel de daño
1	Deslizamiento en el contacto hormigón-blanqueta de apoyo	
2	Deslizamiento en el contacto blanqueta-terreno natural	
3	Hundimiento	
4	Vuelco plástico	
5	Estabilidad global	
6	Erosión interna de trasdós o del cimiento	
7	Socavación	

Observaciones:

Sitio 4		
n°	Tipo de falla	Nivel de daño
1	Hundimiento o arranque de los pilotes	
2	Rotura horizontal del terreno	
3	Erosión del talud	
4	Deslizamiento superficial	
5	Equilibrio global	
6	Erosiones internas y arrastres	
7	Socavación	

Observaciones:

Efectos de licuefacción en la estructura.

En base a lo respondido en el punto anterior:

III. ¿Pudiera usted señalar si existiría problemas de licuefacción?

Sitio 3	
Si	No

Sitio 4	
Si	No

Observaciones:

IV. ¿A qué nivel de daño correspondería?

Sitio 3	
Nivel de daño	

Sitio 4	
Nivel de daño	

Observaciones:

Efectos de tsunami sobre la estructura.

- V. ¿Es posible estimar el comportamiento de la estructura para un tsunami generado por un terremoto Mw=8.8?
- VI. De ser afirmativa la pregunta V, ¿Cuáles serían los efectos que estos pudiesen producir sobre la estructura

9.5 ANEXO INFORME DELPHI 2.

Los resultados obtenidos del cuestionario Delphi enviado a los investigadores participantes de este proceso, serán expuestos y analizados en este informe, con la finalidad de validar el procedimiento en base al nivel de daño estimado y así aportar a la mejora en la respuesta que tenemos como sociedad a los terremotos.

Cabe señalar que la participación de los expertos en este procedimiento es fundamental, por lo que solicito a los investigadores poder asignar parte de su valioso tiempo para finalizar este proceso.

BALANCE GENERAL DELPHI

Dado los resultados que se pudieron obtener de la etapa realizada del método DELPHI, sobre el comportamiento de las estructuras existentes en el sitio 3 y 4, respecto del escenario de catástrofe seleccionado, deja las siguientes conclusiones:

I. Comportamiento de la estructura al terremoto de 1877

El 60% de los expertos respondió la totalidad de esta parte de la encuesta, mientras que el 40% hizo observaciones respecto del nivel de información entregada, por lo cual solo respondió de forma parcial.

El nivel de daños para el sitio 3, según los expertos corresponden principalmente a los problemas de falla de la estabilidad global, erosión interna trasdós y socavación, ya que al ser una estructura de gran inercia, genera una gran resistencia que limita las deformaciones, sin embargo, los efectos de asentamiento de sus capas granulares podrían provocar fallas. De estos resultados es posible la obtención del siguiente Gráfico 9-1.

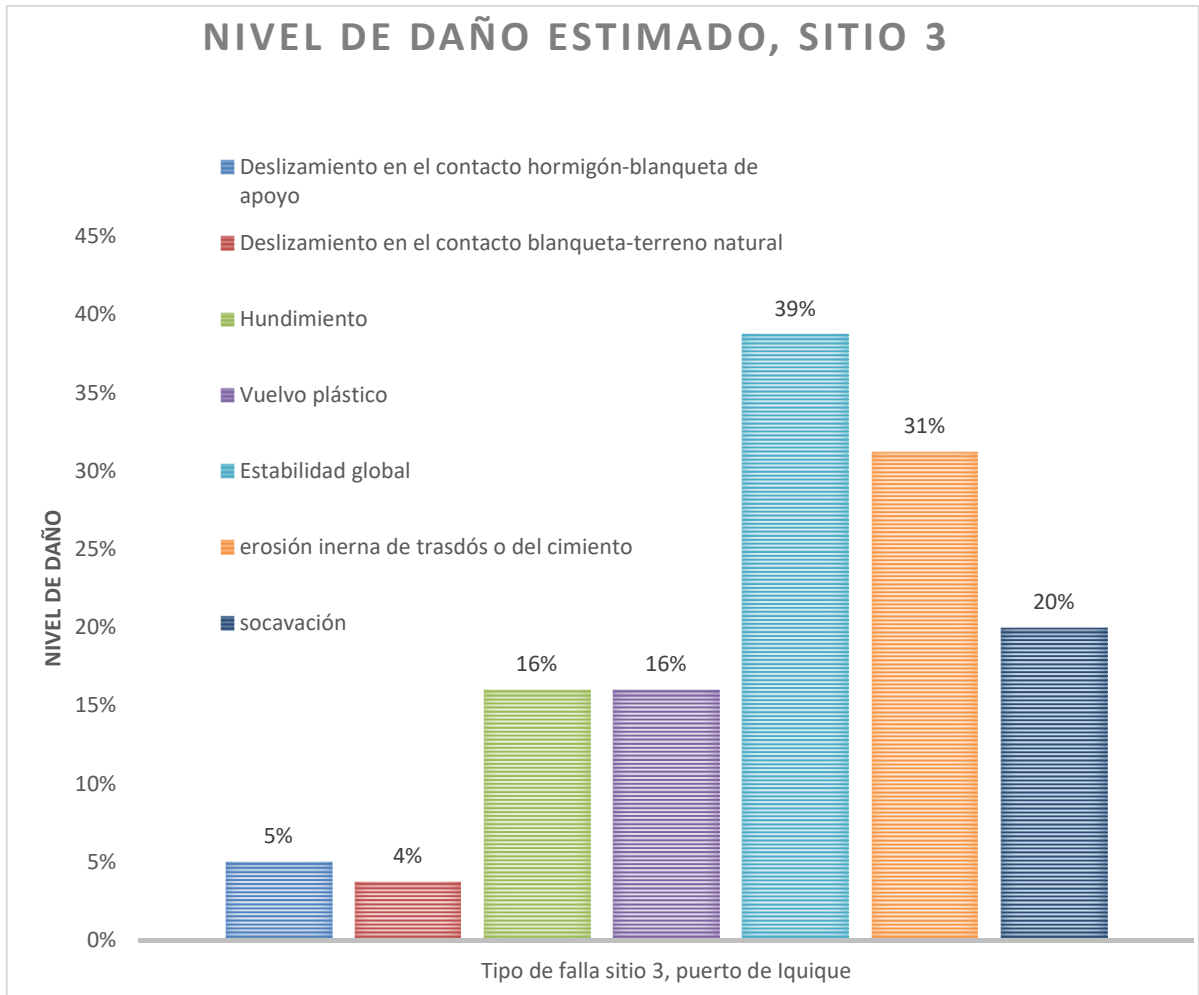


Gráfico 9-1, Comportamiento estimado por los expertos del sitio 3.
Fuente: elaboración propia

Es posible apreciar que el comportamiento del sitio 3 ante un terremoto de las características antes descritas, según los expertos, toda la estructura en su conjunto sufriría daños de diversa consideración, siendo la estabilidad global (39% de daño) el tipo de falla que compromete mayormente la estabilidad de la estructura y por consecuencia, la operatividad del puerto.

El comportamiento del sitio 4, al igual que el sitio 3 fue analizado por los expertos, arrojando los resultados apreciados en el gráfico 9-2.

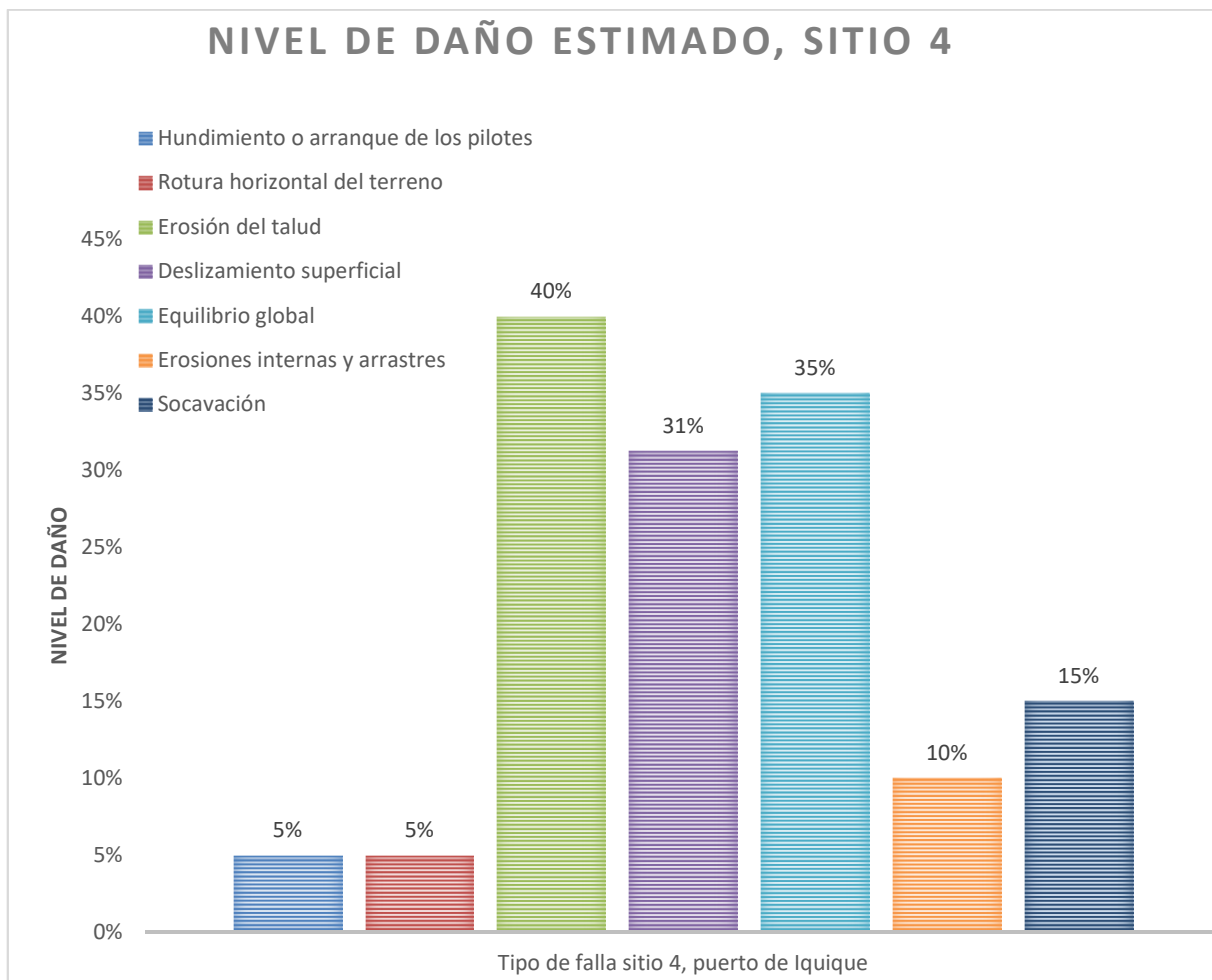


Gráfico 9-2, Comportamiento porcentual estimado por los expertos para el sitio 4.
Fuente: Elaboración propia

Respecto al sitio 4, esta estructura podría sufrir daños moderados por efectos del terremoto correspondiente a erosión del talud (40%), deslizamiento superficial (31%) y equilibrio global (35%).

II. Efectos de licuefacción en la estructura.

El nivel de daño que podría tener la estructura por los efectos de licuefacción no fue posible estimarlo, ya que la mayoría de los participantes optó por no responder directamente la pregunta, al considerar que los antecedentes aportados a la investigación no son concluyentes, así como también, considerando la experiencia y el conocimiento que tienen de la zona, ya que consideran que el suelo existente no es potencialmente licuable.

Sin perjuicio de lo anterior, un experto realizó la observación considerando que, de existir licuefacción en la zona, esta afectaría de mayor forma al sitio 3, ya que a pesar de ser reforzado mediante un tensor, es más vulnerable a los efectos del suelo, como fallas por estabilidad

global o erosión interna, producto de la pérdida de soporte del suelo. Mientras que el sitio 4, señala el experto, que los pilotes se encuentran anclados a roca, por lo que disminuye la probabilidad de licuefacción.

III. Efectos de tsunami sobre la estructura.

Al igual que el caso de licuefacción, los expertos concuerdan que no es posible estimar el comportamiento de la estructura, debido a que la magnitud del sismo entregado, no tiene, necesariamente, directa relación con la forma que se pudiese generar un tsunami. Para una estimación más certera, es necesario recurrir a modelos numéricos o físicos.

Preguntas:

De los resultados expuestos anteriormente:

- Sitio 3
 - ¿Considera usted acertado el nivel de daño? Comente.
 - Con el nivel de daño estimado, ¿cree usted que la infraestructura portuaria podría seguir operando post-terremoto?
 - ¿Qué medidas tomaría usted para disminuir la vulnerabilidad estructural?
- Sitio 4
 - ¿Considera usted acertado el nivel de daño? Comente.
 - Con el nivel de daño estimado, ¿cree usted que la infraestructura portuaria podría seguir operando post-terremoto?
 - ¿Qué medidas tomaría usted para disminuir la vulnerabilidad estructural?
- Considerando su experiencia como parte del proceso, ¿Cuál es su parecer respecto al proceso DELPHI?
- ¿Qué antecedentes considera usted que faltaron en esta encuesta?

Obs:

9.6 ANEXO INFORME DELPHI 3

Dado los resultados que se pudieron obtener de la etapa realizada del método DELPHI, sobre el comportamiento de las estructuras existentes en el sitio 3 y 4, respecto del escenario de catástrofe seleccionado, deja las siguientes conclusiones:

El nivel de daños para el sitio 3, según los expertos corresponden principalmente a los problemas de falla de la estabilidad global, erosión interna trasdós y socavación, ya que al ser una estructura de gran inercia, genera una gran resistencia que limita las deformaciones, sin embargo, los efectos de asentamiento de sus capas granulares podrían provocar fallas.

Considerando además la existencia de un tensor de refuerzo asísmico en los bloques, es posible que por efecto del sismo, exista una disminución en la tensión del tensor, por lo que tendrá ser periódicamente controlado, ya que si la tensión no es la adecuada al momento de la sollicitación, esta podría perder en parte su capacidad asísmico.

En comparación a los daños observados en la recopilación de antecedentes históricos, es posible ver efectos similares a los detectados por los expertos, donde la capacidad portante del suelo para este tipo de fenómenos es la principal amenaza a la estabilidad de la estructura.

Respecto al sitio 4, esta estructura según los expertos, podría sufrir daños significativos por efectos del terremoto correspondiente a erosión del talud, deslizamiento superficial y equilibrio global.

A pesar de ser una estructura que se diseñó y reforzó con las consideraciones actuales de espectros de aceleraciones, así como la consideración de una vida útil de 50 años, es posible que tenga daños por un evento de estas características probables. El caso más cercano es el puerto de Coronel, el cual a pesar de ser un terminal con refuerzo sísmico, sufrió los efectos del terremoto, principalmente a deformaciones y esfuerzos cercanos a $\frac{3}{4}$ del valor de diseño, logrando así que el puerto continuara operando post-terremoto.

Los efectos de Licuefacción y Tsunami que podrían afectar la estructura no fueron posible estimar por los expertos, debido principalmente a los pocos antecedentes que se presentaron respecto de las características geotécnicas del lugar y del tsunami.

Debido a las características y nivel de los daños observados tanto en el análisis delphi como del análisis histórico, podemos ver ciertas similitudes en el nivel y tipo de daño, siendo el de clasificación SEVERO, el que más podría tener perjuicios para la operatividad del puerto. Para lo cual sería interesante establecer para una futura investigación un canal abierto con los responsables de la gestión y respuesta ante una catástrofe, para así lograr mejoras en los procesos de respuesta y recuperación.

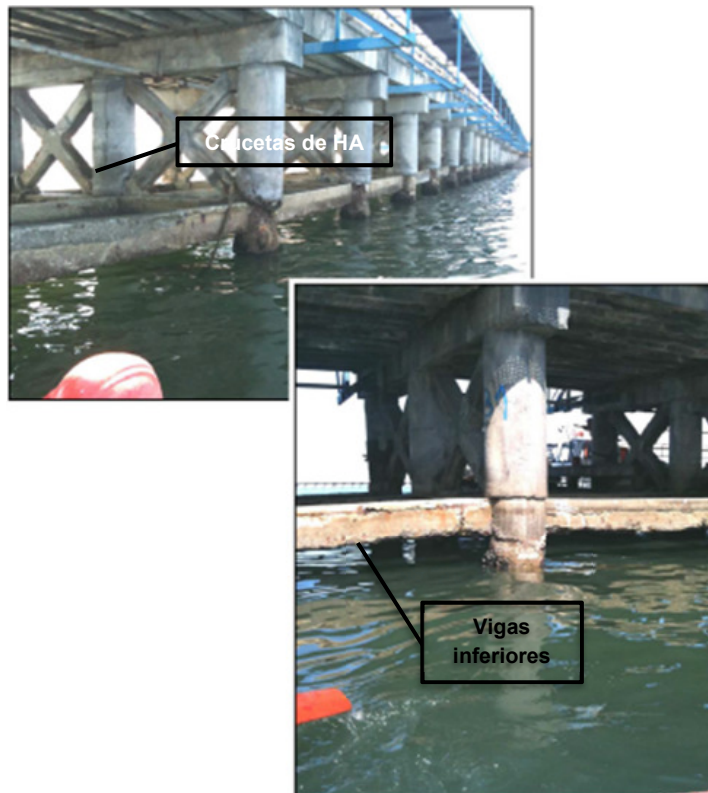
9.7 ANEXO RECOPIACION DE ANTECEDENTES DAÑOS EN ESTRUCTURAS PORTUARIAS.

DAÑOS PUERTO LIRQUÉN

Para mayo de 2010, los sitios N°3 y 4 del Muelle N°1, aún se encontraban cerrados desde el terremoto del 27 de febrero debido a los severos daños sufridos en la estructura de hormigón armado. Además, se estima que el muelle tiene cerca de 60 años desde su creación, por lo que antes del terremoto ya existían daños en su infraestructura.

Se registraron daños en:

- Crucetas de hormigón armado.
- Cortes en unión viga-pilote.
- Grietas y fisuras en los elementos del muelle.
- Desprendimiento de recubrimientos de hormigón.
- Daños en vigas inferiores que rigidizan la estructura.



Algunas de estas vigas resultaron colapsadas, producto de la colisión de barcos que se encontraban atracados durante el terremoto.



Daño típico en las vigas transversales inferiores del puente de acceso.



Daño severo en la conexión de la viga con el pilote inclinado. Armadura expuesta y pérdida de hormigón. Daño severo en la viga longitudinal. Pilote vertical con agrietamiento menor.



Agrietamiento severo en pilote inclinado. Armadura expuesta y pérdida de hormigón. Pilote vertical con agrietamiento menor. Viga longitudinal sin daño aparente.



Daño severo en la conexión de la viga con el pilote inclinado. Armadura expuesta y pérdida de hormigón. Pilote desconectado por falla del perfil de acero que conecta al pilote con la viga. Daño severo en la viga longitudinal.



Posterior al terremoto, los pilotes de estas cepas siguieron asentándose lentamente por algunos meses, producto de las réplicas y de las cargas normales de trabajo, ya que producto de la falla, la capacidad de carga de los pilotes se ve disminuida al producirse el cizallamiento en la interfaz suelo-pilote. En total se midieron asentamientos de hasta aproximadamente 37 cm. en las cepas más asentadas.

Las solicitaciones sísmicas inducidas por el terremoto del 27 de febrero de 2010 excedieron la capacidad de carga de los pilotes, generando un efecto en cadena iniciado por la falla de la interfaz suelo-pilote de los pilotes más débiles. Se estimó que finalmente todos los pilotes que experimentaron asentamientos superiores a 5 cm. sufrieron deterioro en su capacidad de carga, es decir, se encontraron en una condición más débil que su condición previa.

DAÑOS MUELLE PENCO

A raíz del sismo del 27F, el terminal de carga de gráneles sufrió diversos daños estructurales.

A raíz del sismo, la capacidad de soporte de algunos pilotes fue drásticamente reducida, resultando en que la estructura no cumpliera con los factores de seguridad con que había sido diseñada originalmente, por lo cual se realizó un refuerzo de la estructura mediante la incorporación de nuevos pilotes para disminuir las cargas de reacción en los pilotes existentes a fin de obtener factores de seguridad, de la capacidad de soporte de los pilotes, mayores o iguales a los recomendados. Esta reparación tuvo un tiempo aproximado de dos meses y un costo cercano a MM US\$ 2.33.

Alrededor de 53 cepas de pilotes del muelle, presentaron socavamiento en sus zapatas, causando un desplazamiento en la funda de hormigón, perdiendo adherencia entre el hormigón armado y el pilote de acero.

Las características más comunes de los daños observados en los pilotes del muelle fueron:

- Metal de los pilotes a la vista, producto de la socavación del fondo marino.
- Socavación en zapatas cercana a 1 m.
- Zapatas enterradas y escoradas.
- Zapatas agrietadas.

Además de importantes daños en superficie:

- Viga H superior escorada 10 cm.
- Desplazamiento en la estructura del puente de acceso en 20 cm.

Daños en el puente de acceso.

1) Ruptura en sección transversal de pilotes.

Este tipo de falla se presentó en 13 pilotes de un total de 114 que componen las cepas transversales. Corresponde a una falla por pandeo local (en 10 de los casos) y presentándose aproximadamente 1 m bajo la viga transversal de la cepa. En los restantes tres casos la fisura se ubicó en una sección bajo la camisa del pilote.



2) Descenso de pilotes.

Este descenso se presentó en 3 de las cepas longitudinales (22, 33 y 57) y en dos pilotes de las cepas trasversales (56 y 58). El descenso de mayor magnitud se registró en una cepa longitudinal (eje 57) donde se midió 25cm. En las cepas restantes el descenso fue inferior a 15cm.



3) Falla en soldadura de las vigas que componen las cepas transversales.

Este daño correspondió a una torsión del patín de apoyo de la viga castella, el que cedió ante los esfuerzos transversales sobre la viga. Este desplazamiento se registró sólo sobre la cepa 41 y tuvo un corrimiento lateral de 25 cm hacia el oeste.



En algunas cepas las diagonales se cortaron, desoldándose las vigas transversales de la súper estructura que las conforman.



Daños en el cabezo.

En el cabezo se registraron 4 tipos de daños:

- 1) Ruptura de las camisas de hormigón de los pilotes.



- 2) Pilotes desoldados de la cepa transversal.

Se registraron 4 pilotes con daños en la soldadura de conexión en las vigas de las cepas transversales. Dos de ellos corresponden a pilotes verticales y los restantes dos corresponden a pilotes inclinados, donde la soldadura que presentó daños se dio en la conexión entre la plancha de unión pilote-viga.



3) Desplazamiento pilote-jacket.

Se produjo un desplazamiento relativo entre el pilote y el jacket. Este desplazamiento fue de aproximadamente 10 cm.



4) Descenso de la plataforma del cabezo.

Se registró además, un descenso parcial de la plataforma del cabezo lo que causó una inclinación de la grúa. Este descenso fue menor a 10 cm.

Adicionalmente se registraron otros tipos de daños, que si bien no fueron estructurales, debieron ser atendidos para no perjudicar la vida útil de la estructura, como por ejemplo, el

Descenso del fondo marino lo que originó que algunos elementos, denominados fundaciones de las camisas, quedaran sin apoyo.

DAÑOS PUERTO TALCAHUANO

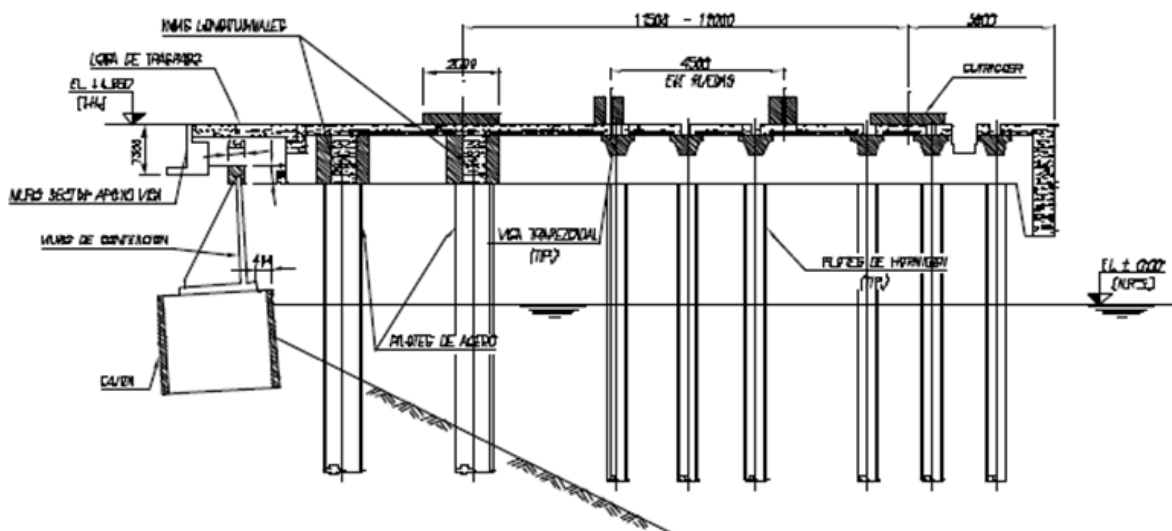
Como consecuencia del terremoto y tsunami del 27 de Febrero del 2010, el tablestacado sufrió una inclinación hacia el lado mar de alrededor de 5° promedio, generando asentamientos importantes en el relleno del espaldón y falla completa del pavimento posterior.



El nuevo delantal de atraque tiene, en este tramo, 159,2 m de largo y 16,0 m de ancho, y está conformado por 25 cepas con pilotes verticales e inclinados en relación H/V: 1/3. La estructura del nuevo malecón fue dividida en cuatro estructuras o módulos independientes: Módulo A (Norte) de 40.0 m, dos Módulos centrales, B & C, de 37.725 m cada uno y Módulo D (Sur) de 43.6 m de largo, todos con 16.0 m de ancho.

DAÑOS PUERTO SAN VICENTE

La extensión del daño en los pavimentos del patio de contenedores se estimó inicialmente en aproximadamente 10 hectáreas. La mayoría de los daños del pavimento y los edificios fueron causados por el hundimiento y el desplazamiento lateral del terreno. La superestructura del muelle sufrió desplazamientos laterales del orden de 1.5 m en promedio en el Sitio N°1 y 0.5 m en los Sitios N°2 y 3. Para el sitio 1 el movimiento del suelo generó un patrón de rotación según las agujas de reloj. En el extremo norte del sitio 1 se registró un desplazamiento de hasta 2 metros.



En el tablero del Sitio 1 y en las explanadas de los sitios 1 y 2, se produjo un desplazamiento perpendicular al eje de los tableros del orden de 2.5 m para la pila A del Sitio 1.

Respecto de los sitios 2 y 3, el desplazamiento medido en terreno sería de aproximadamente 40 cm.

DAÑOS MUELLE ENAP

No se presentaron daños producto del terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010, posiblemente por tratarse de una estructura netamente de acero (con gran capacidad de deformación, y por lo tanto de disipación de energía) destinada a la transferencia de granel líquido (petróleo).

DAÑOS MUELLE CAP HUACHIPATO

Se registraron daños sólo en las instalaciones de Altos Hornos. La condición al momento de ocurrir el terremoto, la grúa TD1 no se encontraba operando, posicionada en la zona de garaje

con la pluma en posición vertical. Consecuencia del terremoto, se descarriló con daños estructurales en todos los bogies.



Consecuencia del terremoto se descarrilaron del lado norte los dos “bogies”, mostrados en las siguientes figuras, dañando estructuralmente estos elementos, la zona de las placas de conexión de la viga compensadora con las columnas principales y todos los pasadores de unión incluido sus alojamientos. Poniendo en una condición de riesgo toda la estructura (TD1) por colapso debido a la inestabilidad de los bogies.



Además se registraron daños en algunas placas de conexión y pasadores, como en la pluma delantera mostrada en la siguiente figura.



Algunos otros daños registrados fueron:

- Daños en alimentación eléctrica de 380V y 4.16kV para alimentar la TD1-TD2 y TD3 respectivamente, además de las líneas auxiliares de iluminación.
- Daños en ductos de soda cáustica y redes de agua industrial, incendio y potable.
- Daños de sala de control n°12, que contiene todo el equipamiento eléctrico de los equipos del muelle.
- Daños en vías de traslación de TD2-TD3 y vías de ferrocarril

DAÑOS CABO FROWARD

No se presentaron daños infraestructurales, ni otros daños mayores de considerar.

DAÑOS PUERTO CORONEL

Producto del terremoto se produjo que los pilotes del estribo de desplazaran chocando la viga de hormigón con la viga metálica. Además, Los pilotes entre los ejes 2 a 4 se inclinaron haciendo girar el ala inferior de la viga transversal, pandeando los atiesadores lado mar. También, La dupla de pilotes inclinados del eje 5 lado sur se desprendió de su apoyo y quedo desplazada alrededor de 1.0 metro hacia el mar quedando sin apoyo este punto. Así mismo, uno de los pilotes de la dupla de pilotes inclinados del eje 8 se desprendió de su apoyo y quedo desplazada alrededor de 2.5 metro hacia el mar quedando sin apoyo este punto. Y finalmente, el daño más común presentado fueron los pilotes desoldados a lo largo de los muelles Norte y Sur de Coronel.