



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE GRÚAS MÓVILES STS EN
MUELLES TRANSPARENTES Y DISEÑO DE ELEMENTO DE FIJACIÓN ANTI-
LEVANTE CUMPLIENDO NORMA NCH2369**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

YEAN AARON ESPARZA HERRERA

PROFESOR GUÍA:

HUGO BAESLER CORREA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALEJANDRO FONT FILAX

JOSÉ GONZÁLEZ WILLSON

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: YEAN AARON ESPARZA HERRERA
FECHA: 25/05/2020
PROFESOR GUÍA: HUGO BAESLER CORREA**

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE GRÚAS MÓVILES STS EN MUELLES TRANSPARENTES Y DISEÑO DE ELEMENTO DE FIJACIÓN ANTI-LEVANTE CUMPLIENDO NORMA NCH2369

Las grúas STS (Ship to Shore) son el principal equipo de carga y descarga de naves en los terminales especializados en la transferencia de contenedores, a las cuales el diseño del sistema muelle – grúa debe garantizar la continuidad operacional, establecida por la norma sísmica industrial.

La estabilidad lateral de estos equipos constituye parte importante en su evaluación de suficiencia estructural. Existe evidencia de fallas en grúas STS por descarrilamiento total y colapso durante terremotos. Estos fenómenos han sido estudiados experimentalmente en distintos trabajos que han confirmado secuencias de descarrilamiento, mediante ensayos de modelos a escala reducidos sobre mesa vibratoria.

La normativa sísmica industrial nacional aborda los problemas de inestabilidades y levantamientos de los grandes equipos móviles en diversas disposiciones de la norma NCh2369 actualizada, estableciendo que no debe aceptarse el descarrilamiento total de equipos y que, de ser necesario, se deben implementar medidas correctivas que garanticen el pleno cumplimiento de la normativa sísmica.

El trabajo se centra en el estudio del comportamiento sísmico de grúas STS para demandas sísmicas establecidas por la norma NCh2369, las cuales son evaluadas mediante análisis de tipo modal – espectral y tiempo – historia no lineal. Para llevar a cabo los análisis sísmicos, se desarrollan modelos integrados de las estructuras en el software SAP2000 versión 20. A partir de estos análisis se busca cuantificar las fuerzas producidas en la interacción grúa – muelle, estos resultados son utilizados para diseñar un elemento de fijación anti – levante.

El elemento de anclaje vertical móvil planteado en este trabajo es una solución en acero, que tiene como objetivo principal restringir el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS, asegurando el no descarrilamiento de estas. A partir de la geometría de una grúa STS “tipo”, se desarrolla una solución que no entorpece la operación en el puerto, permitiendo la plena circulación de los equipos sobre el tablero, sin interferencia alguna. En el software ANSYS Workbench 15 se realiza la modelación y verificación del elemento de fijación anti – levante.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi madre, mi padre y mi hermana por haber sido mi soporte en cada momento, por el cariño y amor infinito que me han brindado y por apoyarme en esta etapa de mi vida que en un comienzo suponía grandes desafíos. Sin duda no podría estar cumpliendo este gran objetivo si no fuera por cada uno de ellos.

Dar gracias a mi profesor guía, Don Hugo Baesler, por su total compromiso y dedicación en el desarrollo del presente trabajo de título. Agradezco a Don José Manuel González y Don Alejandro Font por la disposición a orientar y resolver las dudas surgidas a lo largo de estos meses. Además, quiero agradecer a Don Axel Boenigk, gerente de división de grúas marítimas de Liebherr Chile, por haberme facilitado información valiosísima acerca de las grúas STS, contribuyendo en la realización del presente trabajo de título.

Por último, dar gracias a los amigos que me ha dado la vida, a los de toda la vida y a los que surgieron en esta etapa universitaria. Sin duda han sido tremendamente importantes en mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivos generales.....	2
1.2.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Organización y metodología.....	3
1.3.1.	Contextualización.....	3
1.3.2.	Recopilación de antecedentes.....	3
1.3.3.	Modelación y análisis de estructuras.....	4
1.3.4.	Diseño del sistema de anclaje vertical móvil.....	4
2.	INDUSTRIA PORTURIA.....	5
2.1.	Transporte marítimo de mercancías.....	5
2.1.1.	Contexto mundial.....	5
2.1.2.	Contexto chileno.....	7
2.2.	Estructuras portuarias.....	9
2.2.1.	Muelles.....	9
2.2.2.	Grúa STS.....	12
3.	DESCARRILAMIENTO.....	15
3.1.	Descarrilamiento de grúas STS.....	15
3.1.1.	Modelos físicos a escala.....	15
3.1.2.	Casos de descarrilamiento.....	24
3.1.3.	Consecuencias del descarrilamiento.....	26
3.2.	Revisión de normativa.....	27
3.2.1.	Normativa sísmica chilena.....	27
4.	ANTECEDENTES.....	31
4.1.	Localización del proyecto.....	31
4.2.	Nave de diseño.....	32
4.3.	Mecánica de suelos.....	32
4.4.	Descripción general de las estructuras.....	33
4.4.1.	Grúa STS.....	33
4.4.2.	Frente de ataque.....	33
4.5.	Disposiciones normativas.....	34

4.5.1.	Norma NCh2369 of.2003 Actualizada	34
4.5.2.	Norma NCh2745 of.2013	38
4.5.3.	Norma NCh3171 of.2010	39
5.	MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS.....	40
5.1.	Cargas	40
5.1.1.	Cargas muertas o permanentes	40
5.1.2.	Cargas vivas o sobrecargas.....	40
5.1.3.	Carga de equipos	41
5.1.4.	Cargas sísmicas.....	42
5.1.5.	Combinaciones de cargas	51
5.2.	Modelo del muelle	53
5.2.1.	Materiales	53
5.2.2.	Dimensiones de los elementos estructurales	53
5.2.3.	Geometría de la estructura.....	54
5.2.4.	Suelo de fundación	56
5.2.5.	Modelación de la estructura.....	57
5.3.	Modelo de grúa STS	59
5.3.1.	Geometría	59
5.3.2.	Cargas consideradas en el modelo.....	60
5.4.	Modelo integrado muelle – grúa.....	61
5.5.	Análisis sísmicos de las estructuras	62
5.5.1.	Masa sísmica.....	62
5.5.2.	Análisis Modal – Espectral.....	62
5.5.3.	Análisis Tiempo – Historia.....	63
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN.....	66
6.1.	Resultados Análisis Modal – Espectral.....	66
6.2.	Resultados Análisis Tiempo – Historia.....	67
6.2.1.	Desplazamientos del punto superior del link – conexión (apoyos sin anclaje)	67
6.2.2.	Fuerzas en conexión grúa STS – tablero (apoyos lado mar con anclaje)	69
6.3.	Análisis de Resultados	71
6.3.1.	Modal – espectral.....	71
6.3.2.	Tiempo – historia.....	72
7.	ELEMENTO DE FIJACIÓN ANTI – LEVANTE.....	79
7.1.	Consideraciones iniciales.....	79

7.2.	Cargas de diseño	80
7.3.	Factor de impacto.....	82
7.4.	Factor de seguridad.....	82
7.5.	Criterio de falla	83
7.6.	Diseño y modelación en ANSYS.....	85
7.6.1.	Geometría del modelo	85
7.6.2.	Mallado.....	91
7.6.3.	Condiciones del modelo	93
7.7.	Resultados de la modelación en ANSYS.....	96
7.7.1.	Tensiones en el anclaje	96
7.7.2.	Tensiones en la soldadura.....	97
7.8.	Análisis de resultados ANSYS	99
7.8.1.	Soldadura.....	99
7.8.2.	Desplazamientos.....	100
7.8.3.	Concentración de tensiones en el bogie.....	102
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
8.1.	Conclusiones generales.....	104
8.2.	Conclusiones de análisis sísmicos	105
8.3.	Conclusiones del elemento de fijación anti – levante	107
8.4.	Recomendaciones	108
8.4.1.	Modificaciones al proyecto de norma NCh2369	108
8.4.2.	Canaleta	108
8.4.3.	Unión entre anclaje y bogie	109
8.4.4.	Conexión entre rieles	110
9.	BIBLIOGRAFÍA	111
10.	ANEXOS	113
10.1.	Anexo A: Espectros calculados y combinados con SRSS	114
10.2.	Anexo B: Planos de una grúa STS tipo	118
10.3.	Anexo C: Máximos desplazamientos obtenidos en los eventos sísmicos estudiados	121
10.4.	Anexo D: Máximas fuerzas obtenidas en los eventos sísmicos estudiados	124
10.5.	Anexo E: Diseño de elementos secundarios del sistema de anclaje	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Factores de escala entre el prototipo real y el modelo.	15
Tabla 3.2: Factores de escala utilizados.	20
Tabla 3.3: Registros de aceleración utilizados en el experimento.	21
Tabla 3.4: Disposiciones de la norma NCh2369 actualizada relacionadas con el descarrilamiento.	27
Tabla 4.1: Dimensiones generales de la nave de diseño.	32
Tabla 4.2: Disposiciones de la norma NCh2369 consideradas en el trabajo.	34
Tabla 4.3: Disposiciones de la norma NCh2745 consideradas en el trabajo.	38
Tabla 4.4: Disposiciones de la norma NCh3171 consideradas en el trabajo.	39
Tabla 5.1: Valores de columna de agua.	40
Tabla 5.2: Valores de sobrecarga de uso.	40
Tabla 5.3: Posición de grúas STS en casos analizados.	41
Tabla 5.4: Factores para determinación de espectro NCh2745.	45
Tabla 5.5: Factores de amplificación de los registros sísmicos.	49
Tabla 5.6: Simbología de las cargas.	51
Tabla 5.7: Combinaciones de carga.	52
Tabla 5.8: Materiales de los elementos estructurales.	53
Tabla 5.9: Dimensiones de los elementos estructurales.	53
Tabla 5.10: Estratigrafía del suelo de fundación.	56
Tabla 5.11: Constantes de balasto estáticas.	56
Tabla 5.12: Dimensiones de la grúa STS.	59
Tabla 5.13: Cargas consideradas en el modelo de la grúa STS.	60
Tabla 6.1: Resultados de esfuerzos máximos, Análisis modal – espectral.	66
Tabla 6.2: Desplazamientos transversales y verticales máximos para cada registro analizado. ...	67
Tabla 6.3. Resultados de fuerzas máximas para cada registro analizado.	69
Tabla 7.1: Máximas fuerzas obtenidas en la modelación.	80
Tabla 7.2: Tipos de contactos utilizados en la modelación.	94
Tabla 7.3: Contactos entre los elementos modelados.	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Comercio marítimo internacional en términos de las toneladas cargadas (Fuente: Informe sobre el transporte marítimo).....	5
Figura 2.2: Tonelaje movilizado en exportación e importación en Chile – Años 2009 al 2018 (Fuente: Directemar).....	7
Figura 2.3: Tonelaje movilizado en contenedores en Chile – Años 2009 al 2018 (Fuente: Directemar).....	8
Figura 2.4: Principales partes que constituyen un muelle.	9
Figura 2.5: (a) Muelle de penetración. (b) Muelle marginal.	10
Figura 2.6: (a) Muelle de pilotes. (b) Muelle de pilas.	11
Figura 2.7: (a) Muelle de gravedad. (b) Muelle - pantalla.	11
Figura 2.8: Primera grúa de STS desarrollada. (Fuente: Development of design of ship to shore container cranes).....	12
Figura 2.9: Esquema del desarrollo de las grúas STS.	13
Figura 2.10: Principales componentes de una grúa STS.	14
Figura 3.1: (a) Dimensiones del modelo a escala reducido. (b) Fotografía del modelo sobre la mesa vibratoria.	16
Figura 3.2: Esquema del comportamiento del modelo.	16
Figura 3.3: Dimensiones del modelo experimental y detalle contacto rueda – riel.....	17
Figura 3.4: Respuesta del modelo – Componente NS Kobe Port Island.....	18
Figura 3.5: Respuesta tridimensional del modelo – Componente NS Kobe Port Island.....	19
Figura 3.6: Dimensiones del modelo experimental.	20
Figura 3.7: Modelo a escala reducido sobre mesa vibratoria.	21
Figura 3.8: Respuesta en términos de desplazamientos transversales y verticales de apoyos lado mar y lado tierra.....	22
Figura 3.9: Descarrilamiento de grúa STS en Kobe, Japón, 1995. (Fuente: Nonlinear seismic responses of container cranes including the contact problem between wheels and rails).	24
Figura 3.10: Descarrilamiento de grúa STS en San Antonio, Chile, 2010. (Fuente: CONEIC XXII).	24
Figura 3.11: Colapso de grúa STS en Palu, Indonesia, 2018. (Fuente: SIOP Talcahuano 2018).	25
Figura 3.12: Distancia riel lado mar – borde muelle y ubicación de cabina de mando.....	26
Figura 3.13: Esquema de ubicación de contrapesos para evitar levantamiento. (Fuente: NCh2369 actualizada).....	29
Figura 4.1: Ubicación de sitios 1 al 8 y del frente de atraque N°2 – Valparaíso, Chile.....	31
Figura 4.2: Dimensiones generales del muelle modelado.	33
Figura 4.3: Espectro de diseño definido por la norma NCh2745. (Fuente: NCh2745 of.2013)....	38
Figura 5.1: Espectro de diseño horizontal – NCh2369 actualizada.....	43
Figura 5.2: Espectro de diseño vertical - NCh2369 actualizada.....	44
Figura 5.3: Registro de aceleraciones – Constitución 2010, Componente L.	46
Figura 5.4: Registro de aceleraciones – Constitución 2010, Componente T.	46
Figura 5.5: Registro de aceleraciones – Constitución 2010, Componente V.	46
Figura 5.6: Registro de aceleraciones – Matanzas 2010, Componente L.....	47
Figura 5.7: Registro de aceleraciones – Matanzas 2010, Componente T.....	47
Figura 5.8: Registro de aceleraciones – Matanzas 2010, Componente V.	47

Figura 5.9: Registro de aceleraciones – Llolleo 1985, Componente 100.....	48
Figura 5.10: Registro de aceleraciones – Llolleo 1985, Componente 10.....	48
Figura 5.11: Registro de aceleraciones – Llolleo 1985, Componente UP.....	48
Figura 5.12: Combinación SRSS de espectros calculados a partir de registros de aceleración y espectro de referencia definido por el espectro elástico de NCh2745.....	49
Figura 5.13: Combinación SRSS de espectros calculados a partir de registros de aceleración amplificados y espectro de referencia definido por el espectro elástico de NCh2745.	50
Figura 5.14: Vista tridimensional de la geometría N° 1 y eje de coordenadas.....	54
Figura 5.15: Vista tridimensional de la geometría N° 2.	54
Figura 5.16: Vista en elevación de la geometría N° 1. Plano Y-Vertical.....	55
Figura 5.17: Vista en elevación de la geometría N° 2. Plano X-Vertical.....	55
Figura 5.18: Vista en planta de la geometría. Plano X-Y.....	55
Figura 5.19: Vista tridimensional del modelo N° 1.....	57
Figura 5.20: Vista tridimensional del modelo N° 2.....	57
Figura 5.21: Vista tridimensional del modelo N° 3.....	58
Figura 5.22: Vista en elevación del modelo N° 1. Plano Y-Vertical.	58
Figura 5.23: Vista tridimensional y dimensiones de la geometría de la grúa.....	59
Figura 5.24: Puntos de aplicación de las cargas Q/2 en la grúa STS.	60
Figura 5.25: Vista tridimensional del modelo integrado.	61
Figura 5.26: Vista tridimensional de la alineación de los bogies con los pilotes de los ejes A y E.	61
Figura 5.27: Vista tridimensional de la conexión grúa - tablero. Caso modal – espectral.	62
Figura 5.28: Vista tridimensional de link – conexión de la grúa STS y el tablero. Caso tiempo – historia N° 1.....	63
Figura 5.29: Vista tridimensional de la conexión entre la grúa STS y el tablero. Caso tiempo – historia N° 2.....	64
Figura 5.30: Puntos de aplicación 1 de las cargas Q/2 en la grúa STS (Posición P1).....	65
Figura 5.31: Puntos de aplicación 2 de las cargas Q/2 en la grúa STS (Posición P2).....	65
Figura 6.1: Simbología de ubicación de grúas STS, análisis de desplazamientos en apoyos.	67
Figura 6.2: Desplazamiento transversal del punto 2, grúa N° 2, registro de Constitución 2010... ..	68
Figura 6.3: Desplazamiento vertical de punto 2, grúa N° 2, registro de Constitución 2010.	68
Figura 6.4: Simbología de posición de grúas y conexión más solicitada.	69
Figura 6.5: Fuerza axial de la conexión N°4, grúa N°2, registro de Constitución 2010.	70
Figura 6.6: Fuerza de corte en el eje transversal, conexión N°2, grúa N°2, registro de Constitución 2010.....	70
Figura 6.8: Referencia de combinación de demandas sísmicas E_{y1}	71
Figura 6.9: Combinación SRSS (sin amplificar) de espectros calculados y espectros elásticos definidos por NCh2369 y NCh2745.	72
Figura 6.10: Simbología de puntos de conexión de las grúas analizadas.....	73
Figura 6.11: Desplazamiento vertical y transversal del punto 2, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.....	74
Figura 6.12: Desplazamiento vertical de los puntos 2 y 4, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.....	74
Figura 6.13: Desplazamiento vertical de los puntos 2 y 4, segundos 30 al 40, registro de Constitución 2010.....	75

Figura 6.14: Compresión en links 2 y 4, grúa N° 2, registro Constitución 2010.	75
Figura 6.15: Desplazamiento vertical de los puntos 3 y 4, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.....	76
Figura 6.16: Desplazamiento transversal de los puntos 3 y 4, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.....	76
Figura 6.17: Fuerzas de tracción y corte en el eje transversal de la conexión N°4, grúa N°2, posición P1, registro de Constitución.	77
Figura 6.18 Fuerzas de tracción y corte en el eje transversal de la conexión N°4, grúa N°2, posición P2, registro de Constitución.	78
Figura 7.1: Esquema de disposición de sistema de anclaje.	79
Figura 7.2: Esquema de rueda y riel.	80
Figura 7.3: Esquema de puntos de conexión de las grúas STS en el modelo.....	81
Figura 7.4: Esquema de ubicación de rótulas en los bogies.	81
Figura 7.5: Componentes del tensor de tensiones.	83
Figura 7.6: Vista tridimensional de los elementos modelados.	85
Figura 7.7: Vista lateral de los elementos modelados.	85
Figura 7.8: Vista frontal de los elementos modelados.....	86
Figura 7.9: Vista tridimensional del modelo considerando un solo anclaje.....	86
Figura 7.10: Vista frontal de elemento de anclaje.	87
Figura 7.11: Dimensiones del elemento de anclaje.	87
Figura 7.12: Vista tridimensional de elementos del bogie modelado.....	88
Figura 7.13: Vista tridimensional del anclaje, bogie y soldadura.	88
Figura 7.14: Vista tridimensional del riel modelado.	89
Figura 7.15: Vista frontal del riel modelado.....	89
Figura 7.16: Vista tridimensional de clamps y riel.....	90
Figura 7.17: Vista frontal de clamps y riel.	90
Figura 7.18: Vista tridimensional del mallado del modelo.	91
Figura 7.19: Detalle del refinamiento el mallado en anclaje.	91
Figura 7.20: Vista lateral del mallado del modelo.....	92
Figura 7.21: Detalle de condición de carga en el modelo.	93
Figura 7.22: Detalle de condición de apoyos en el modelo.....	95
Figura 7.23: Distribución de tensiones de Von Mises en el elemento de anclaje.	96
Figura 7.24: Distribución de tensiones de Von Mises (a): De soldadura y anclaje. (b) De soldadura.....	97
Figura 7.25: Distribución de tensiones de Von Mises en soldadura, detalle de sector de contacto inferior entre la soldadura y el anclaje.....	97
Figura 7.26: (a) Detalle de unión de filetes de soldadura en la zona inferior. (b) Filetes de soldadura sin unir en zona inferior.	99
Figura 7.27: Detalle máxima tensión de Von Mises en soldadura sin considerar unión de filetes de soldadura.....	99
Figura 7.28: Desplazamiento de los elementos en el eje transversal.....	100
Figura 7.29: Desplazamiento de los elementos en el eje vertical.	100
Figura 7.30: (a): Desplazamiento transversal del anclaje. (b) Desplazamiento vertical del anclaje.	101

Figura 7.31: Concentración de tensiones en sector de aplicación de la carga de diseño (Caso carga aplicada en varios puntos).	102
Figura 7.32: Concentración de tensiones en sector de aplicación de la carga de diseño (Caso carga puntual).....	103
Figura 8.1: (a) y (b) Descarrilamiento en San Antonio, Chile, 2010. (c) Colapso grúa STS en Palu, Indonesia, 2018.....	104
Figura 8.2: Comparación de espectro definidos por normativa y calculados con registros de aceleración en estudio.....	106
Figura 8.4: Esquema de unión apernada entre anclaje y bogie.	109
Figura 8.5: (a) Soldadura de arco. (b) Soldadura aluminotérmica.	110
Figura 10.1: Distribución de elementos secundarios.....	127
Figura 10.2: Esquema de modelo desarrollado para determinar fuerzas de diseño.	127

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La actividad económica y crecimiento del país requiere cada vez más inversión en infraestructura portuaria, debido a la exportación e importación de productos/cargas. Hay terminales portuarios que se han especializado en la transferencia de contenedores y otros en la carga de graneles. En el caso de los terminales especializados en transferencia de contenedores, en Chile, los proyectos se iniciaron en los años 90 atendiendo naves panamax. En la actualidad todos los terminales portuarios para contenedores se están construyendo o adaptando para atender naves post-panamax de mayor capacidad de carga, mayor calado y eslora. Los nuevos proyectos que están en desarrollo en el país ya consideran grandes naves super post-panamax.

Las grúas móviles STS (Ship to Shore) constituyen una parte esencial en la operación del puerto, ya que son el equipo principal de la carga y descarga de naves portacontenedores, a las cuales el diseño del sistema muelle – grúa debe garantizar la continuidad operacional establecida por la norma sísmica industrial. Actualmente en los terminales portuarios de contenedores, la operación de las grúas STS se realiza mediante un operador en cabina localizado en el brazo “boom” de la grúa, ubicado a unos 50 metros de altura. Para el sismo de diseño, el operador debe permanecer en la cabina durante el terremoto.

Hay bibliografía de estudios del comportamiento sísmico de grúas STS en muelles transparentes, donde se han elaborado modelos físicos a escala, sobre mesa vibratoria, los cuales se han solicitado con registros de terremotos, confirmándose que hay una secuencia de levantamiento de las ruedas sobre el riel, que finalmente conducen al total descarrilamiento de la grúa STS.

Las grúas STS se pueden volcar con la acción del viento, para lo cual se disponen elementos de anclaje grúa – muelle para evitar el volcamiento. Las tormentas y vientos de alta velocidad se pronostican con anticipación, para lo cual las grúas STS se posicionan y anclan en el muelle de acuerdo con lo proyectado.

En el caso de los terremotos, no existe la posibilidad de prever el evento sísmico, por lo tanto el análisis y diseño sísmico del sistema muelle – grúa, debe garantizar la seguridad del operador que permanece en la grúa, estando una nave atracada. En todos los casos la grúa STS no puede volcarse en el tablero, aún si se ha descarrilado, lo cual debe ser asegurado por el diseño sísmico.

La norma sísmica industrial NCh2369, establece un requerimiento de limitar el levantamiento de las ruedas sobre el riel de las grúas móviles, entendiéndose que el levantamiento excesivo y descarrilamiento de las ruedas de la grúa, pondría en riesgo la continuidad operacional del equipo y en riesgo un eventual operador que permanece en la grúa durante el terremoto.

Actualmente, en los muelles transparentes de sitios de atraque para naves de contenedores, no se ha resuelto o considerado el requerimiento de la norma NCh2369, la cual hoy con su capítulo 13, no hay duda de que es obligatoria su aplicación en el diseño sísmico del sistema muelle – grúa.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

El objetivo de este trabajo de título es proponer la solución de un sistema de anclaje vertical móvil, que asegure el no descarrilamiento de las ruedas de las grúas STS sobre los rieles del tablero. El diseño debe cumplir la normativa sísmica actual NCh2369 y su Capítulo 13, el cual ya ha sido incorporado como requisito técnico para la revisión y aprobación de proyectos portuarios por la DOP-MOP.

La solución que se adopte debe permitir la plena circulación de los equipos sobre el tablero, sin interferencia alguna. Se propone desarrollar una solución para nuevos proyectos, que también sea aplicable a los actuales muelles en operación en el país, en los cuales se podrán realizar ajustes/modificaciones locales en la estructura/muelle y grúa para cumplir con NCh2369.

1.2.2. Objetivos específicos

1. A partir del desarrollo del trabajo, establecer una metodología de análisis para el modelo integrado muelle-grúa, tanto para análisis de tipo modal – espectral como para análisis tiempo – historia no lineal.
2. Obtener mediante análisis sísmicos modal – espectral las máximas fuerzas solicitantes en la interacción muelle – grúa STS.
3. Describir mediante análisis sísmicos tiempo – historia no lineal el comportamiento de los bogies, en términos de sus desplazamiento verticales y transversales, al permitir su libre desplazamiento en los ejes transversal, longitudinal y vertical.
4. Obtener mediante análisis sísmicos tiempo – historia no lineal las máximas sollicitaciones en la interacción muelle – grúa STS del lado mar, al permitir el desplazamiento vertical libre de los bogies lado tierra.
5. Confirmar si se requiere implementar la solución de anclaje móvil en ruedas – bogies lado tierra y lado mar, o sólo puede ser suficiente la implementación del sistema de anclaje móvil en ruedas – bogies lado mar para cumplir con NCh2369.

1.3. Organización y metodología

El desarrollo del trabajo de investigación requiere de etapas lógicas que buscan cumplir los objetivos planteados inicialmente. Esta sección tiene como propósito definir los capítulos y etapas que dan forma a este trabajo, describiendo cada uno de estos de manera general. De este modo se pretende que cada uno de los procesos presentados a lo largo del documento sean entendidos e interpretados de buena manera.

1.3.1. Contextualización

En primer lugar, en el Capítulo 2, se realiza una contextualización del comercio marítimo nacional e internacional, haciendo especial énfasis en la movilización de carga mediante contenedores. Adicionalmente, se presentan las principales características de las estructuras que permiten la movilización de mercancías, estas son los muelles y las grúas Ship to Shore, en el caso de transporte de contenedores.

El descarrilamiento de las grúas STS es el principal problema que se estudia en este trabajo de título, esto se encuentra descrito en el Capítulo 3, en el cual se presentan estudios experimentales que abordan el problema, casos reales de descarrilamiento de grúas STS y lo dispuesto por la normativa sísmica nacional acerca del tema.

1.3.2. Recopilación de antecedentes

La definición de las bases de diseño para el estudio, localización del proyecto, mecánica de suelos del sitio del proyecto, el tipo de muelle a analizar, estructuración, planos asociados a la geometría del frente de atraque, el tipo de grúa STS a considerar y antecedentes generales fueron proporcionados por la empresa PMI Energy Services.

Se ha estudiado la actualización de la norma NCh2369, especialmente los Capítulos 5 y 13. El primero de estos establece los lineamientos de los análisis sísmicos que se deben realizar en el diseño de estructuras industriales, mientras que el Capítulo 13 establece los requisitos mínimos aplicables a las estructuras marítimo – portuarias.

Por otra parte, se tienen en consideración las normas NCh2745 (o espectro de referencia) y NCh3171. El espectro elástico de la norma NCh2745 (de Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica) se utiliza en el apartado de análisis especiales de la norma NCh2369, mientras que la norma NCh3171 establece las combinaciones de carga a considerar en el diseño estructural.

Esta información relevante está descrita en el Capítulo 4 del presente trabajo de título y representa los datos de entrada para desarrollar modelos que permiten analizar el problema planteado e intentar dar una solución factible y óptima.

1.3.3. Modelación y análisis de estructuras

Utilizando el software SAP2000 versión 20 se realiza la modelación de un frente de atraque de tipo transparente, el cual considera pilotes verticales de acero, vigas transversales y longitudinales de hormigón armado y el tablero de hormigón armado.

La naturaleza de esta investigación obliga a que el frente de atraque debe considerar la integración de grúas STS sobre el tablero, para esto se dispone de un modelo de grúa STS modificado y ajustado para que cumpla con las características de operación establecidas en las bases de diseño del proyecto.

Los análisis realizados son de dos tipos: modal – espectral y tiempo – historia no lineal. En el primero de estos análisis, se dispone de las grúas STS conectadas al frente de atraque mediante apoyos rotulados. En los análisis modal – espectral, la demanda sísmica corresponde a los espectros de aceleración elásticos definidos por la norma NCh2369 (actualizada). A partir de la ejecución de estos análisis se pueden obtener las fuerzas solicitantes en los cuatro apoyos de las grúas STS sobre el tablero.

Adicionalmente, se ejecutan análisis tiempo – historia no lineal donde la no linealidad del sistema la constituye el tipo de apoyo utilizado para modelar el fenómeno del levantamiento de los apoyos de las grúas STS. Tal como lo establece la normativa sísmica nacional, para ejecutar análisis de tipo tiempo – historia se deben usar registros de aceleraciones de, al menos, tres eventos sísmicos; en el presente trabajo se utilizan los registros de Constitución 2010, Matanzas 2010 y Llolleo 1985.

A partir de la ejecución de análisis tiempo – historia no lineal se puede describir el comportamiento de los bogies en términos de sus desplazamientos transversales y verticales. Adicionalmente, se pueden obtener las fuerzas solicitantes en los apoyos rueda – riel del lado mar, al permitir el descarrilamiento de los apoyos lado tierra.

En los Capítulos 5 y 6 del presente trabajo de título se describe detalladamente la modelación de las estructuras estudiadas y los resultados obtenidos de la ejecución de los análisis modal – espectral y tiempo – historia no lineal previamente mencionados en esta sección.

1.3.4. Diseño del sistema de anclaje vertical móvil

Luego de obtenidos los resultados de los análisis sísmicos, se procede a plantear el diseño de los anclajes verticales móviles. La forma y dimensiones que se plantean están determinadas a partir de la magnitud de las solicitaciones obtenidas en los análisis sísmicos, planos de detalle de los bogies correspondientes a grúas Liebherr y las características de los rieles utilizados en los muelles de contenedores. Los planos de detalle de los bogies de las grúas STS fueron proporcionados por Liebherr Chile.

El sistema de anclaje es una solución en acero que debe cumplir con las necesidades y características propias de la industria portuaria, en el sentido de no entorpecer la operación y circulación de todo tipo de maquinaria sobre el tablero del muelle.

En el software ANSYS Workbench 15 se realiza la modelación y verificación de la solución en acero del anclaje vertical móvil que impide el levantamiento y descarrilamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS. En el Capítulo 7 del presente trabajo de título se describe lo previamente mencionado.

2. INDUSTRIA PORTUARIA

El presente Capítulo tiene como objetivo precisar la importancia del comercio marítimo mundial, se presentan cifras de movilización de carga o mercancía en el mundo y en Chile. En particular, se hace énfasis en el segmento del mercado del comercio marítimo que está mayormente relacionado con este trabajo: la movilización de carga en contenedores. Por otra parte, se muestran y describen las principales estructuras portuarias: el muelle o frente de atraque y la grúa de contenedores o grúa STS.

2.1. Transporte marítimo de mercancías

2.1.1. Contexto mundial

En el mundo actual se tiene completamente normalizado el transporte de todo tipo de mercancías, tales como petróleo, gas, productos tecnológicos, productos químicos, graneles, contenedores, entre otros. Estos productos o mercancías se pueden transportar vía terrestre, aérea o marítima. En particular, se estima que "aproximadamente el noventa por ciento de los bienes de carga del mundo se transportan por mar " (Castonguay & Stone, 2010 citado en Hand, 2014).

En el año 2017, el comercio marítimo mundial aumentó su volumen en un 4% con respecto al año 2016, alcanzando un total aproximado de 10.700 millones de toneladas transportadas. Los segmentos del mercado con mejor desempeño fueron las mercancías contenedorizadas (6.4% de crecimiento) y a granel (4% de crecimiento). Por otra parte, en el año 2017 el comercio contenedorizado representó un 17.1% del comercio marítimo total (UNCTAD, 2018).

A lo largo de la última década, ha ocurrido un sostenido incremento en el volumen de mercancías transportadas por el comercio marítimo internacional. La Figura 2.1 muestra que, tanto el comercio marítimo en su totalidad, como el segmento del mercado de transporte de contenedores tuvieron un crecimiento constante en los últimos años.

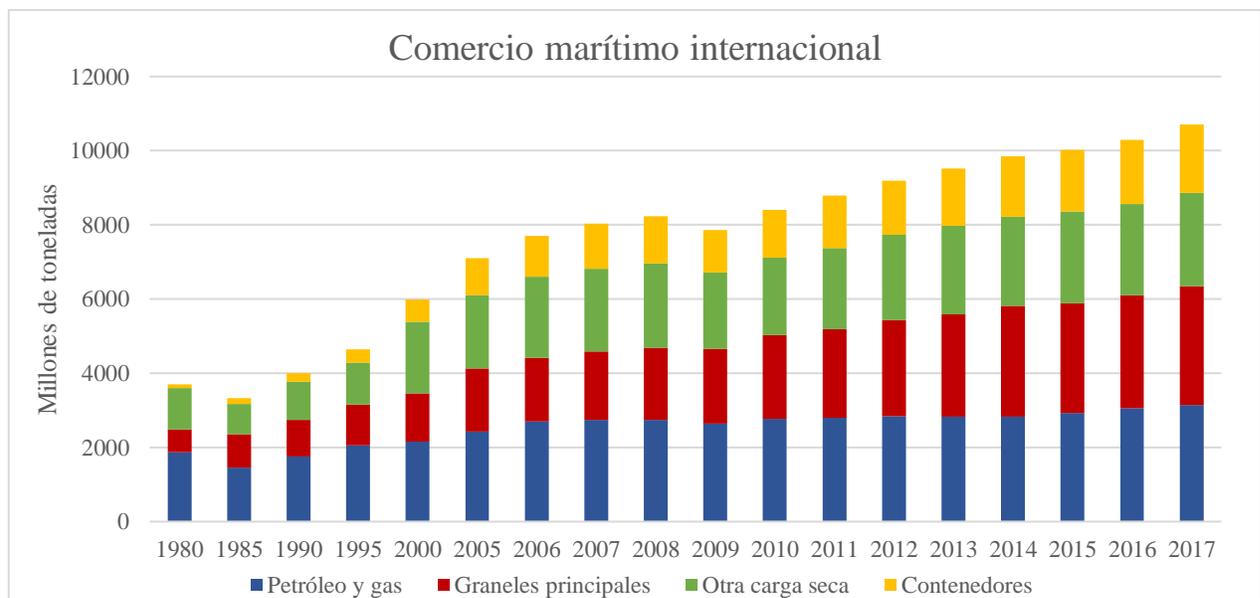


Figura 2.1: Comercio marítimo internacional en términos de las toneladas cargadas (Fuente: Informe sobre el transporte marítimo).

Además, “el comercio marítimo está prosperando, con la ayuda de la reactivación económica mundial. Las perspectivas generales a corto y medio plazo son positivas: crecimiento del PIB mundial de más del 3% y un aumento del volumen del comercio de mercancías del 4% en 2019” (UNCTAD, 2018), lo que obliga a los países a mantener estándares de calidad altos en su infraestructura portuaria.

Los datos de distribución del comercio marítimo mundial por región indican que Asia influye de manera excepcional, ya que fue origen y destino del 42% y el 61% del comercio marítimo mundial en 2017, respectivamente. Los siguientes puestos en la clasificación los ocupan Europa (origen del 17% y destino del 20%), América (origen del 21% y destino del 13%), Oceanía (origen del 13% y destino del 1%) y finalmente África (origen del 7% y destino del 5%). A partir de lo anterior, se tiene que las regiones mayormente exportadoras son América, Oceanía y África, mientras que las regiones mayormente importadoras son Asia y Europa (UNCTAD, 2018).

2.1.2. Contexto chileno

Los puertos desempeñan un papel fundamental en el desarrollo económico de las regiones de Chile, sirviendo las necesidades de importación y exportación de productos al exterior. El sistema portuario nacional está compuesto por 77 terminales portuarios: 13 estatales de uso público (agrupados en 10 empresas portuarias estatales), 17 privados de uso público y 47 privados de uso privado, además de múltiples terminales menores de conectividad y actividades pesqueras.

En Chile, en el año 2018 se exportaron (vía marítima) más de 66 millones de toneladas de mercancías o productos, mientras que las cifras de importación de carga (vía marítima) alcanzan las 56.7 millones de toneladas movilizadas (Directemar - Armada de Chile, 2019). En la Figura 2.2 se observa que, al igual que en el comercio marítimo mundial, en Chile se tiene tendencia al alza en el tonelaje movilizado durante la última década.

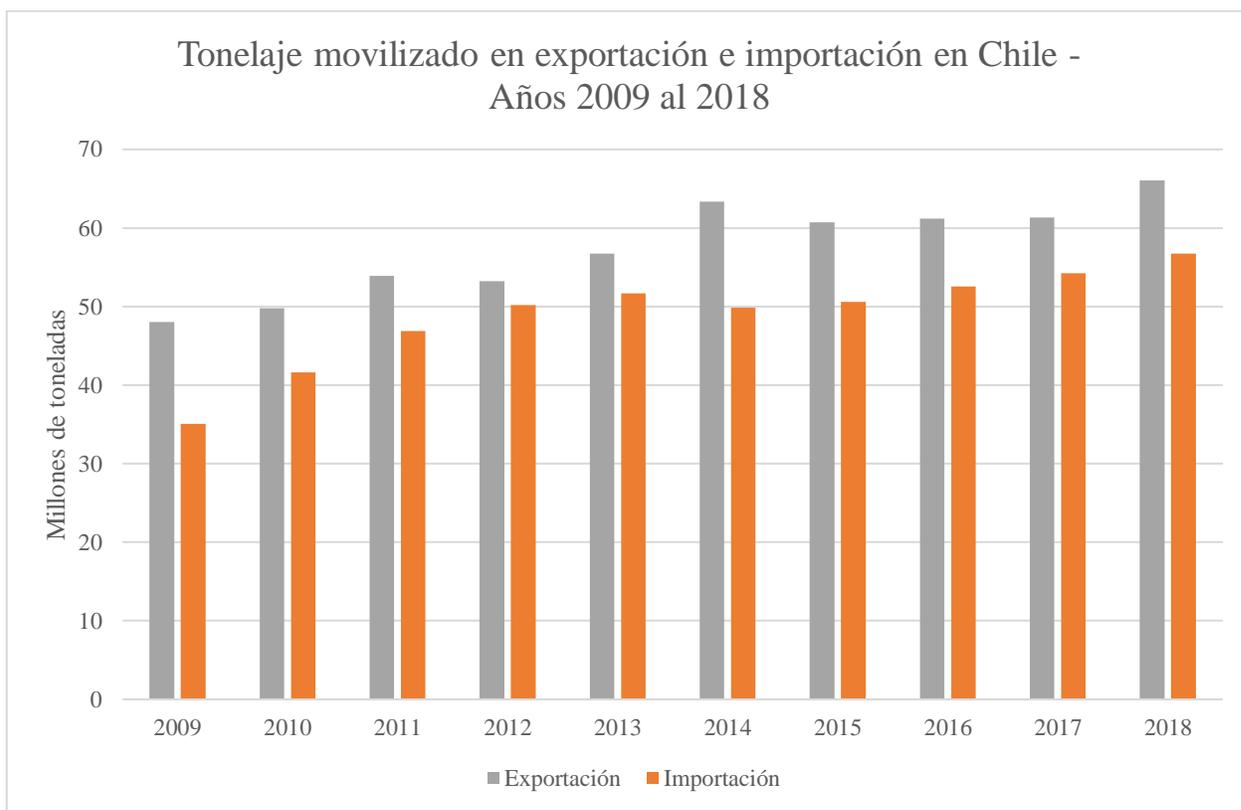


Figura 2.2: Tonelaje movilizado en exportación e importación en Chile – Años 2009 al 2018 (Fuente: Directemar).

En lo que se refiere a la movilización de productos en contenedores, las cifras indican que el año 2018 se transportaron más de 42 millones de toneladas en 2.8 millones de contenedores, siendo estos transferidos principalmente en los puertos de la zona centro – sur del país (Directemar - Armada de Chile, 2019). La Figura 2.3 muestra la sostenida alza del tonelaje movilizado en contenedores durante la última década.



Figura 2.3: Tonelaje movilizado en contenedores en Chile – Años 2009 al 2018 (Fuente: Directemar).

2.2. Estructuras portuarias

A continuación, se presentan las principales características de las estructuras portuarias estudiadas en el presente trabajo de título. Los muelles y las grúas STS son esenciales en la operación portuaria, ya que permiten la carga y descarga de los buques portacontenedores.

2.2.1. Muelles

Un muelle es una estructura que se construye al borde del agua, ya sea en el mar, ríos o lagos, adecuada para atracar embarcaciones y facilitar las operaciones de embarque y desembarque de mercancías o pasajeros.

En general, los muelles presentan dos planos de superficies libres. El primero consiste en un plano vertical de agua desde su línea de borde que permite el atraque adosado de los buques, mientras que el segundo es un plano horizontal, ubicado sobre el nivel medio del mar, superficie apta para las operaciones de carga y descarga.

La Figura 2.4 muestra las principales partes que constituyen un muelle:



Figura 2.4: Principales partes que constituyen un muelle.

La Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas (Ministerio de Obras Públicas, 2013) establece clasificaciones de los muelles de acuerdo a su orientación y de acuerdo a su impacto en la dinámica costera.

2.2.1.1. De acuerdo a su orientación

2.2.1.1.1. Muelle de penetración

Estructura (también es conocida como espigón) orientada perpendicularmente, o con cierto ángulo, respecto de la línea costera. En la Figura 2.5.a se observa un muelle con estas características.

2.2.1.1.2. Muelle marginal

Contrario al muelle de penetración, un muelle marginal es una estructura orientada normalmente paralela a la línea de costa, también es conocida como malecón. La Figura 2.5.b muestra un muelle con estas características.

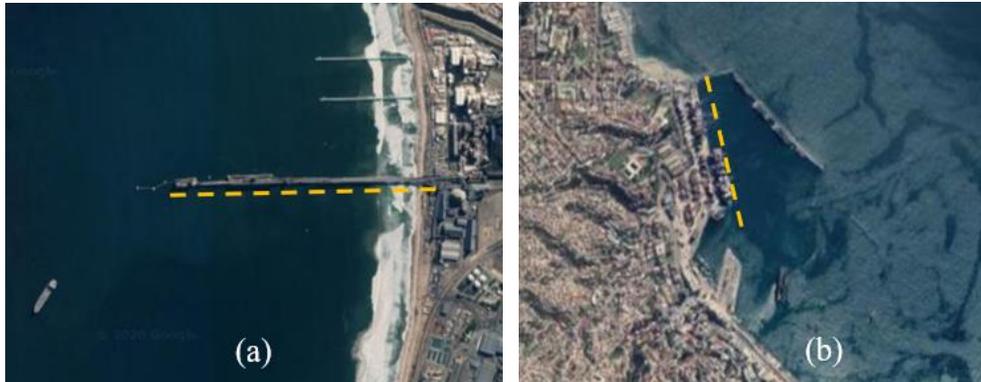


Figura 2.5: (a) Muelle de penetración. (b) Muelle marginal.

2.2.1.2. De acuerdo a su impacto en la dinámica costera

2.2.1.2.1. Muelle transparente

Estructuras formadas por un tablero sustentado en pilas o pilotes, permitiendo el paso del flujo de agua y oleaje bajo este. Los muelles transparentes presentan una menor obstrucción a los flujos de corrientes y olas, por lo tanto los cambios en el régimen marino adyacente son relativamente menores.

De acuerdo a la manera en que la estructura resiste y transmite las cargas al terreno de cimentación, los muelles transparentes se subdividen en:

- **Muelle de pilotes**

La plataforma o tablero está sustentada en pilotes verticales y/o inclinados. Las solicitaciones verticales son resistidas por los pilotes, los que, mediante su resistencia de punta, de fuste o la combinación de estas transmiten las cargas al terreno de fundación. Las solicitaciones horizontales pueden ser resistidas directamente por momento en los pilotes verticales o a través de esfuerzos de tracción y compresión en el caso de pilotes inclinados.

- **Muelle de pilas**

La principal diferencia con respecto al muelle de pilotes es que la estructura resistente está formada por un tablero apoyado en pilas, generalmente construidas por estructuras de gravedad. Estas, mediante su peso propio y la resistencia al deslizamiento en el contacto suelo – estructura, son

capaces de soportar las cargas verticales y horizontales. La principal característica de este tipo de muelles es que requieren suelos de fundación de alta capacidad portante.

La Figura 2.6 muestra los tipos de muelles transparentes previamente descritos.

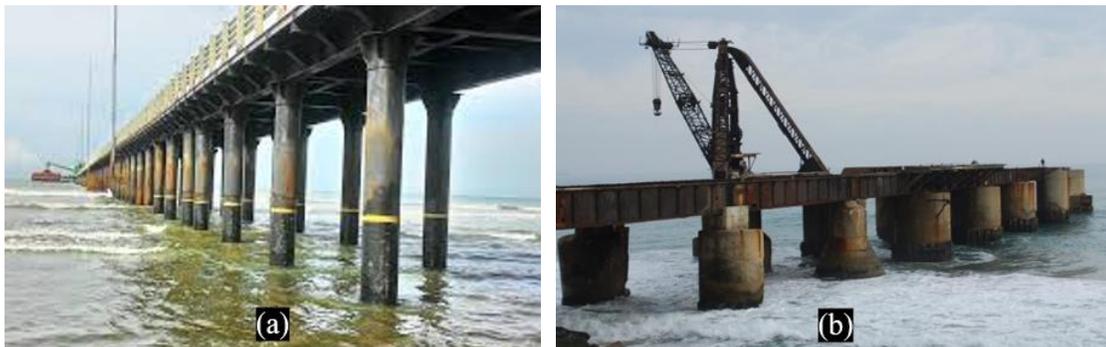


Figura 2.6: (a) Muelle de pilotes. (b) Muelle de pilas.

2.2.1.2.2. Muelle opaco

En los muelles opacos la estructura conforma un paramento continuo vertical o cuasivertical de la línea de atraque desde la superestructura a la cimentación. Contrario a los muelles transparentes, los muelles opacos generalmente no permiten el flujo y oleaje de agua a través de su estructura, por ende, representan una obstrucción a los flujos de corrientes y olas. A continuación, se describen los dos tipos de estructuras consideradas como muelles opacos:

- **Muelle de gravedad**

La estructura principal es un muro gravitacional que contiene el terreno posterior mediante su peso propio y la resistencia al deslizamiento en el contacto suelo – estructura. Las estructuras de gravedad requieren un suelo de fundación de alta capacidad portante, por lo tanto pueden ser utilizados en roca, arenas densas y arcillas densas.

- **Muelle – pantalla**

También conocidos como muelles de tablestacas, los muelles pantalla contienen el terreno adyacente mediante el empotramiento de una pantalla y el uso de anclajes en el trasdós. Este tipo de estructura suele ser construida sobre terrenos arenosos y limosos.

La Figura 2.7 muestra los tipos de muelles opacos previamente descritos.

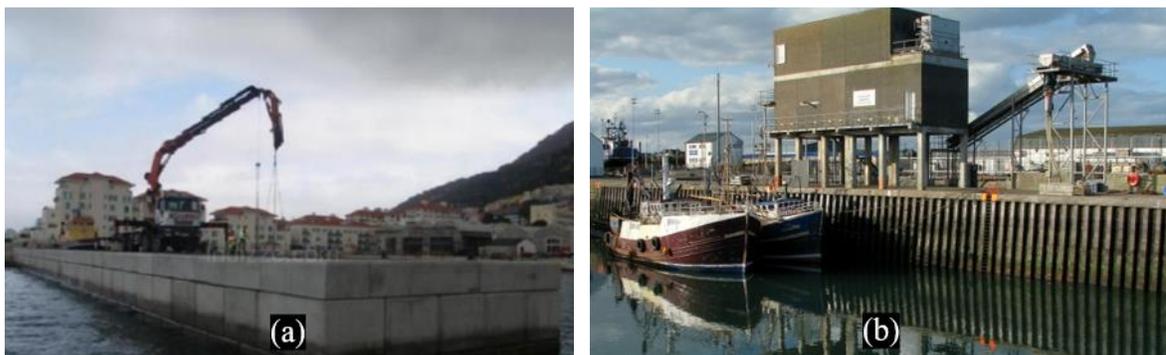


Figura 2.7: (a) Muelle de gravedad. (b) Muelle - pantalla.

2.2.2. Grúa STS

Ya conocidas las cifras de movilización de contenedores en Chile y el mundo, es fundamental comprender las partes constituyentes y la manera en que opera la maquinaria que hace posible la carga y descarga de naves portacontenedores: las grúas de contenedores o grúas STS (ship to shore).

Las grúas STS son las más grandes utilizadas en la operación de un puerto de contenedores. En la actualidad son controladas por un operador especialmente capacitado que busca la máxima eficiencia en los procesos de carga y descarga, en el futuro en Chile los proyectos portuarios considerarán grúas STS robóticas, al igual que otros equipos de la operación de manejo y almacenamiento de contenedores en el puerto. Además, en la actualidad están diseñadas de manera específica para cada cliente de acuerdo con las necesidades propias de cada proyecto portuario.

2.2.2.1. Historia y desarrollo de las grúas STS

Antes de la implementación de grúas STS, los puertos en el mundo no estaban bien preparados para manejar contenedores pesados y la forma de carga y descarga de naves era mediante grúas giratorias. En el año 1959, PACECO desarrolló la primera grúa STS de alta velocidad del mundo (Figura 2.8), la que se estableció en Encinal Terminals en Alameda, California.

Los resultados de la implementación de esta grúa fueron inmediatos, reduciendo el tiempo de atención del barco de tres semanas a dieciocho horas (ASME-a, 2013 citado Hand, 2014). A pesar de las muchas mejoras realizadas a esta estructura inicial, todas las grúas de contenedores modernas son descendientes de la grúa implementada en el puerto de California.



Figura 2.8: Primera grúa de STS desarrollada. (Fuente: Development of design of ship to shore container cranes)

Posterior a la implementación de la primera grúa de contenedores, se produjo un aumento acelerado de tráfico de contenedores y por consiguiente una extensión en las dimensiones de las naves de contenedores. Las grúas prestan el servicio de carga y descarga de buques, por lo tanto, las

dimensiones de estas se fueron adecuando a la evolución naviera. La Figura 2.9 representa el constante desarrollo y ampliación de las grúas STS.

En la actualidad, la manera en que se mide la capacidad de carga de una nave de contenedores es a través de los TEUs, un TEU corresponde un contenedor normalizado de 20 pies (6.1 m). Generalmente, las naves se cargan con contenedores de 20 y 40 pies, es decir 1 TEU y 2 TEUs. A continuación, se presenta la evolución de naves de contenedores:

- **Naves Panamax:**

Desarrolladas desde la década de los 70 y con una capacidad de carga de 4500 TEUs, este tipo de naves tienen dimensiones de hasta 290 metros de eslora (largo) y 32 metros de manga (ancho).

- **Naves Post-Panamax:**

Desarrolladas desde mediados de la década de los 80 y con una capacidad de carga de 6000-8500 TEUs, este tipo de naves tienen dimensiones aproximadas de 340 metros de eslora (largo) y 43 metros de manga (ancho).

- **Naves Super Post-Panamax:**

Generación de naves desarrolladas desde la década de los 90, las naves super post-panamax son las más modernas y actualmente tienen una capacidad de carga de 18000 a 20000 TEUs. En la actualidad tienen dimensiones aproximadas de 400 metros de eslora (largo) y 59 metros de manga (ancho).

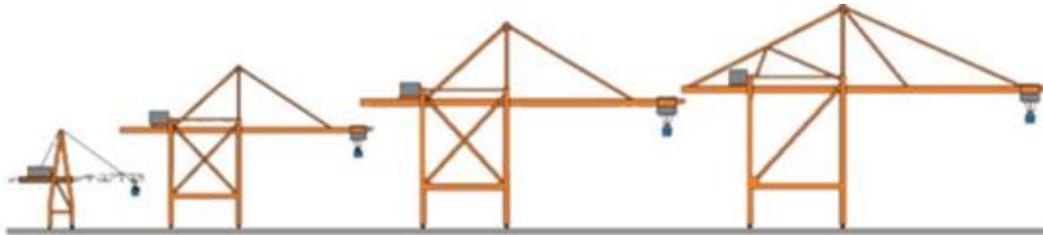


Figura 2.9: Esquema del desarrollo de las grúas STS.

2.2.2.2. Componentes principales

A continuación, se describen los principales componentes de una grúa STS (Figura 2.10):

- **Pórtico:**

El pórtico es el encargado de mantener la estabilidad y transmitir las cargas hacia el muelle. En general, está dotado de una o más riostras que contribuyen a la rigidez del sistema estructural.

- **Viga principal (Boom):**

Conformada por una viga metálica, permite el desplazamiento del carro, la cabina, el equipo de elevación y por consiguiente los contenedores. Estructuralmente, es una viga doblemente apoyada con voladizos a ambos lados del pórtico, el voladizo de mayor luz está situado en el

lado mar. Además, superiormente también es sostenida por tirantes que transmiten los esfuerzos a las columnas principales.

- **Trolley:**

Es la estructura que se desplaza a lo largo de la viga principal y permite al sistema de elevación trasladar los contenedores desde la nave hacia el muelle o viceversa. Además, cuenta con la cabina de mando donde un operador controla los movimientos para transferir la carga.

- **Equipo de elevación:**

Principalmente comprende el polipasto (tambor de elevación, el motor de inducción, la reductora y el freno), el cableado y el spreader. Tiene como función elevar los contenedores para cargarlos o descargarlos a cualquier sector de los buques.

- **Sala de máquinas:**

Está situada sobre la viga principal hacia el sector lado tierra y contiene todos los sistemas mecánicos necesarios para la operación de las grúas, tales como sistemas eléctricos y electrónicos de traslación del trolley, cable utilizado en el sistema de elevación de carga, entre otros.

- **Bogie:**

Corresponde al conjunto de ruedas metálicas que, situadas sobre rieles, permiten la traslación de la grúa STS a lo largo del frente de atraque.

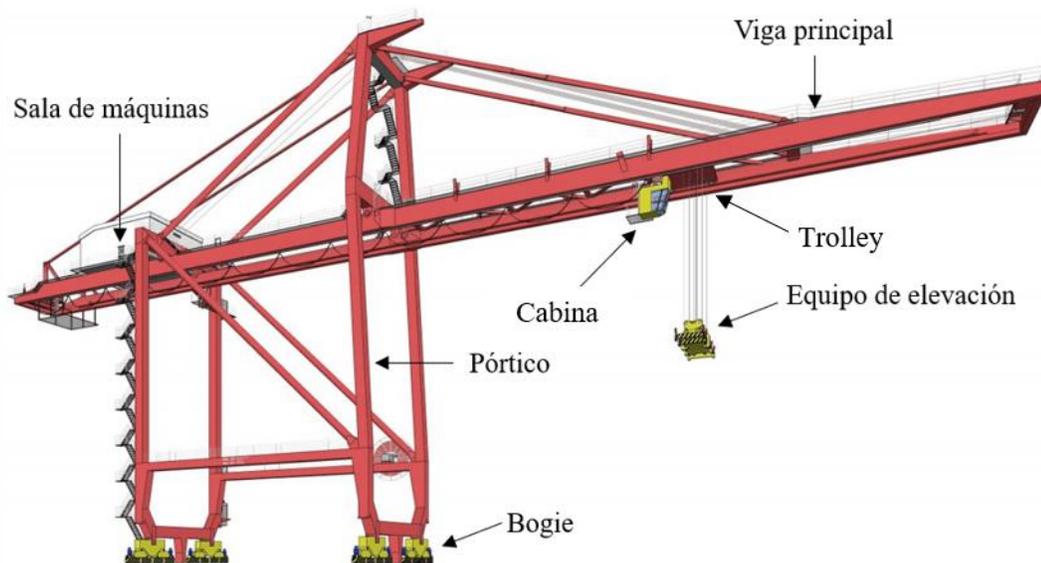


Figura 2.10: Principales componentes de una grúa STS.

3. DESCARRILAMIENTO

El presente Capítulo tiene como propósito describir el problema del descarrilamiento de las grúas STS. Se presentan diversos estudios realizados que permiten entender la relevancia y el peligro que suscita el hecho de que una grúa STS se descarrile durante el terremoto del sismo de diseño, megaterremoto de 8.5 Mw o mayor. Adicionalmente, se realiza una revisión de la normativa sísmica nacional, buscando requisitos aplicables que aborden el tema del descarrilamiento y planteen posibles soluciones que permitan controlar un total descarrilamiento y al mismo tiempo mantener el cumplimiento de la continuidad operacional del sitio de ataque.

Se debe tener en consideración que la norma sísmica chilena NCh2369 – “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales” tiene como principios básicos la protección de la vida y la continuidad de operación en la industria. Además, uno de sus objetivos específicos es “evitar el colapso de estructuras para sismos más severos que el sismo de diseño” (Instituto Nacional de Normalización, 2003).

3.1. Descarrilamiento de grúas STS

3.1.1. Modelos físicos a escala

En las últimas décadas se han desarrollado diversos trabajos que estudian el comportamiento sísmico de las grúas STS, en estos se aborda el fenómeno del levantamiento y descarrilamiento de las ruedas-bogies de las grúas STS.

A continuación, se presentan tres trabajos de investigación en los cuales se describe el comportamiento del sistema rueda-riel a través de la elaboración y experimentación de modelos físicos a escala de grúas STS sobre una mesa vibratoria.

3.1.1.1. Interacción entre muelle y grúa de contenedores durante terremotos

- Antecedentes

El primer trabajo, titulado “Estudio de la interacción entre el muelle y la grúa de contenedores durante terremotos”, investiga el efecto de la interacción entre la grúa STS y el muelle, desarrolla simulaciones numéricas y pruebas experimentales en un modelo a escala reducido en 1/15 (Yamamoto, y otros, 2000). Los principales factores de escala entre el prototipo real y el modelo se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Factores de escala entre el prototipo real y el modelo.

Parámetro	Dimensiones	Prototipo	Modelo
Largo	[m]	1	1/15
Tiempo	[s]	1	$1/\sqrt{15}$
Aceleración	[m/s ²]	1	1
Masa	[kg]	1	1/15 ³
Momento de inercia	[kg m]	1	1/15 ⁵
Módulo elasticidad	[kg/m ²]	1	1

El modelo tiene las dimensiones que se detallan en la Figura 3.1, el material que constituye la grúa y los pilotes es acero, por simplicidad se consideran 4 pilotes, la grúa posee ruedas sobre rieles,

ambos diseñados manteniendo una forma similar a la que tienen en la realidad. Por otra parte, los registros sísmicos utilizados en los ensayos corresponden a: Hachinehe NS, Ohunato E41S y Portisland NS. Por último, las mediciones hechas en los ensayos corresponden a: aceleración, esfuerzos en los elementos y desplazamientos verticales relativos entre las ruedas y el tablero (mediante medidores láser).

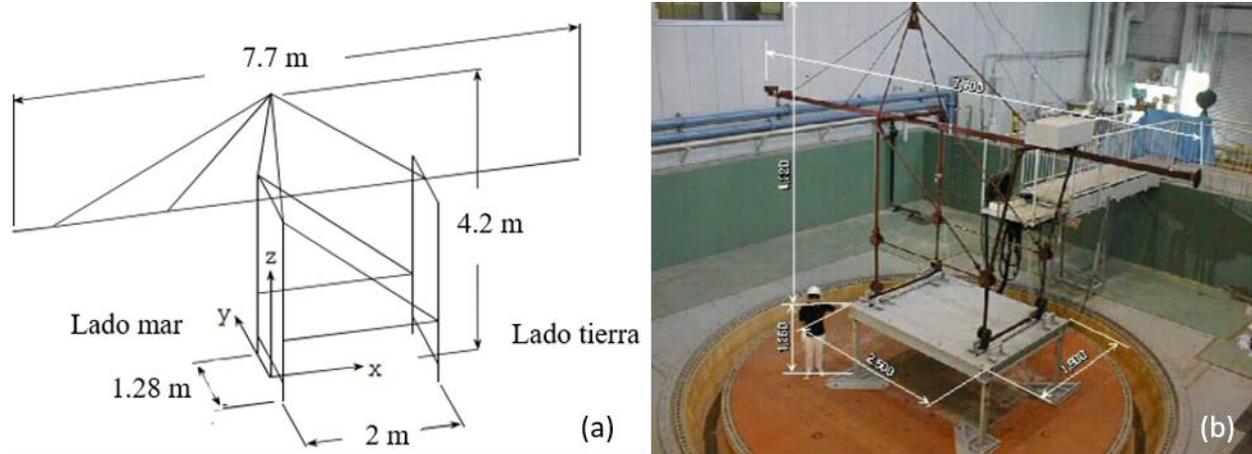


Figura 3.1: (a) Dimensiones del modelo a escala reducido. (b) Fotografía del modelo sobre la mesa vibratoria.

- Respuesta sísmica

El ensayo muestra que el comportamiento de la grúa y el muelle durante el terremoto es el siguiente: Cuando la parte superior del muelle y de la grúa, producto de la aceleración horizontal, se mueven hacia el lado mar (Figura 3.2.a), las ruedas lado tierra se levantan perdiendo su condición de apoyo (Figura 3.2.b). Luego, la carga axial en el apoyo lado mar aumenta, produciendo deformaciones en estas (Figura 3.2.c). Finalmente, las ruedas lado tierra descenden fuera del riel, descarrilándose hacia el sector entre los rieles (Figura 3.2.d). En este estudio se confirma con el modelo, el mecanismo de falla y colapso de la grúa STS, a partir del cual en el año 2000 y en adelante, se mejoró el diseño de las grúas STS y las de mayor capacidad, incorporando un refuerzo en el pórtico inferior transversal de la grúa para evitar la falla y colapso de la grúa descarrilada sobre el tablero.

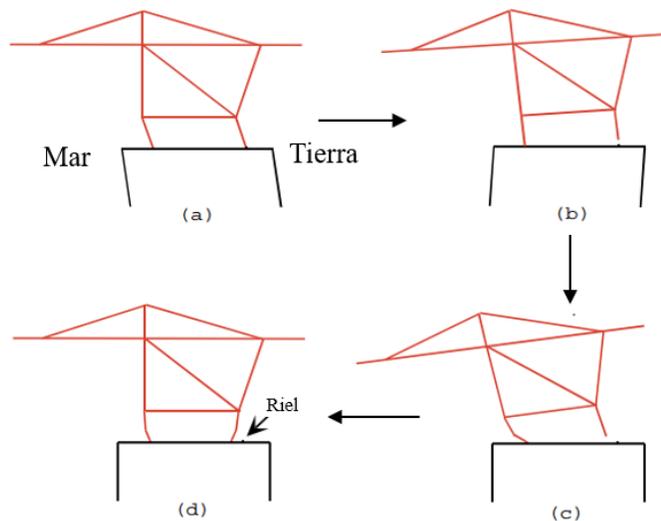


Figura 3.2: Esquema del comportamiento del modelo.

3.1.1.2. Respuesta no lineal de grúas de contenedores

- Antecedentes

El segundo estudio presentado se titula “Respuesta no lineal de grúas de contenedores incluyendo el problema de interacción entre ruedas y rieles” (Kobayashi, Kuribara, Honda, & Watanabe, 2004). En este trabajo se propone un método para modelar las grúas móviles, incluyendo la interacción rueda-riel, con el propósito de modelar la respuesta sísmica de manera más realista.

Adicionalmente, se realizan simulaciones numéricas de un modelo experimental a escala 1/8 de una grúa STS sobre mesa vibratoria, la cual fue sometida a aceleraciones sísmicas horizontales en las dos direcciones. La ejecución del ensayo considera dos etapas principales: primero se ensaya la estructura aplicando el registro de aceleraciones en una dirección horizontal. Luego, se realiza el ensayo aplicando los registros de aceleraciones en las dos direcciones horizontales.

Las dimensiones del modelo experimental de la grúa STS y el detalle del contacto rueda-riel utilizado en el estudio se muestra en la Figura 3.3, se observa que la grúa ensayada tiene 7.88 metros de altura, la viga principal es de 14.45 metros de largo y se considera una base de goma de 45 milímetros de espesor a ambos lados del riel, con el objeto de no dañar las ruedas en caso de que se descarrilen.

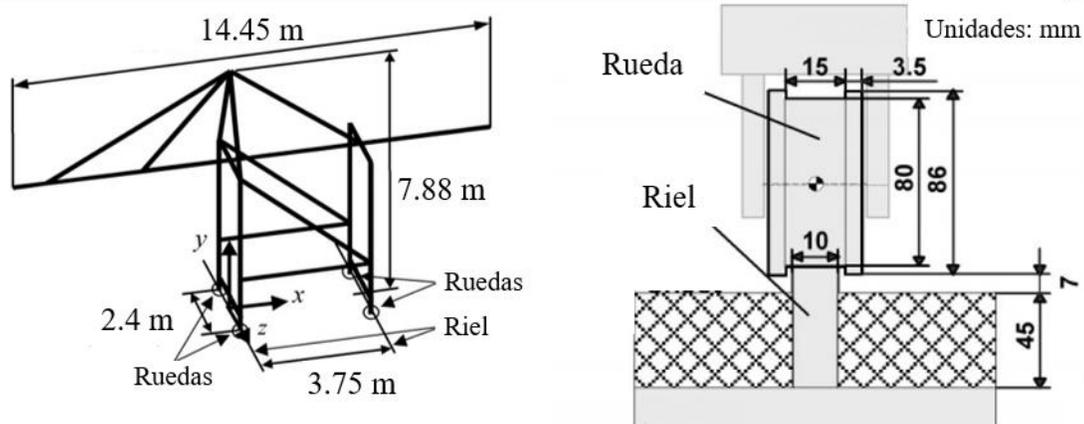


Figura 3.3: Dimensiones del modelo experimental y detalle contacto rueda – riel.

Las simulaciones de respuesta no lineal hechas corresponden a desplazamientos y levantamientos de las ruedas de los bogies como resultado de la excitación horizontal de un terremoto. El registro de aceleraciones utilizado en ambas direcciones corresponde a la componente NS – Kobe Port Island del terremoto de Kobe de 1995.

- Respuesta sísmica

-Excitación Uni-axial

Se realiza el ensayo aplicando el registro de aceleraciones en la dirección X. La Figura 3.4 presenta los resultados obtenidos, donde las figura (a) y (b) representa los desplazamientos verticales y horizontales de las ruedas lado mar, las figura (c) y (d) muestran lo correspondiente a las ruedas lado tierra y la figura (e) representa el registro de aceleración aplicado.

El comportamiento se puede describir de la siguiente manera: Las ruedas lado tierra se levantan y descarrilan en el segundo 2.5 aproximadamente. Luego de algunos segundos descarriladas, las ruedas se elevan nuevamente y recuperan su ubicación inicial en los rieles en el segundo 3.6. Después, ocurre el levantamiento y descarrilamiento de las ruedas lado mar en el segundo 3.6, descendiendo hacia el sector interior (entre los rieles). Se observa que las ruedas lado mar no regresan a su ubicación inicial sobre los rieles.

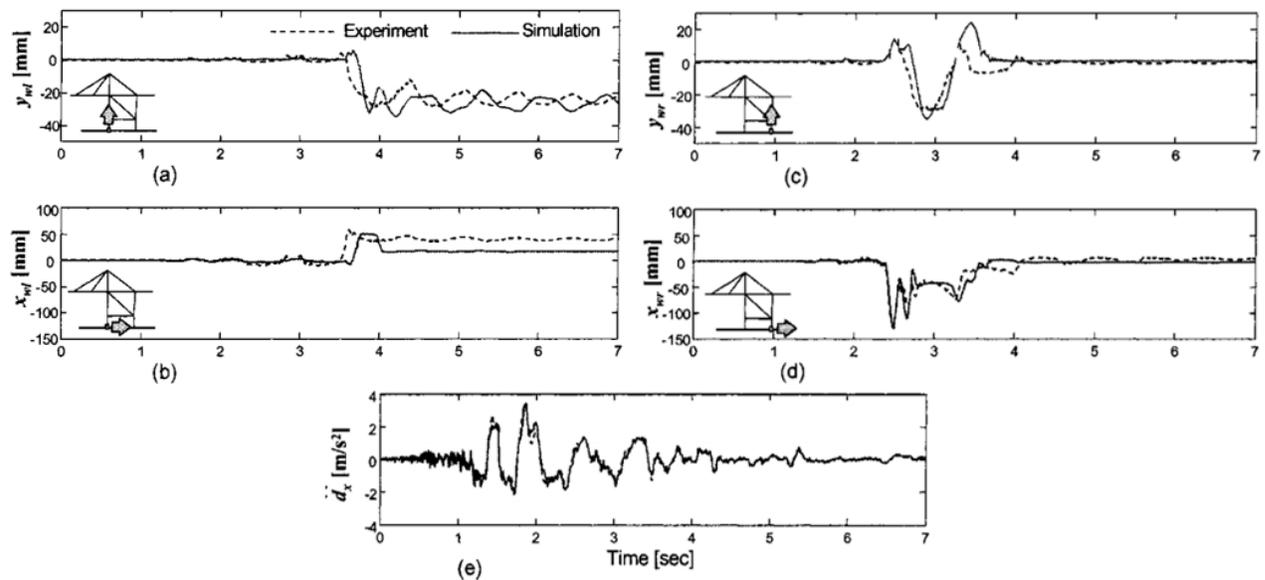


Figura 3.4: Respuesta del modelo – Componente NS Kobe Port Island.

- Excitación Bi-axial

En este caso se aplica el registro de aceleraciones en las dos direcciones horizontales, la dirección X y la dirección Z. La Figura 3.5 presenta los resultados obtenidos: los desplazamientos horizontales y verticales de las ruedas trasera lado mar, trasera lado tierra, delantera lado mar y delantera lado tierra son mostradas en las figuras (a), (b), (c) y (d), las aceleraciones de la parte superior de la grúa STS se muestran en la figura (e) y los registros de aceleraciones aplicados se presentan en la figura (f).

El comportamiento de la grúa STS se puede describir de la siguiente manera: las dos ruedas lado tierra se levantan y descarrilan hacia el sector entre los rieles en el segundo 2.5 aproximadamente. Después, la rueda delantera lado mar se descarrila en el segundo 2.9. Finalmente, la rueda trasera lado mar se descarrila en el segundo 3.5.

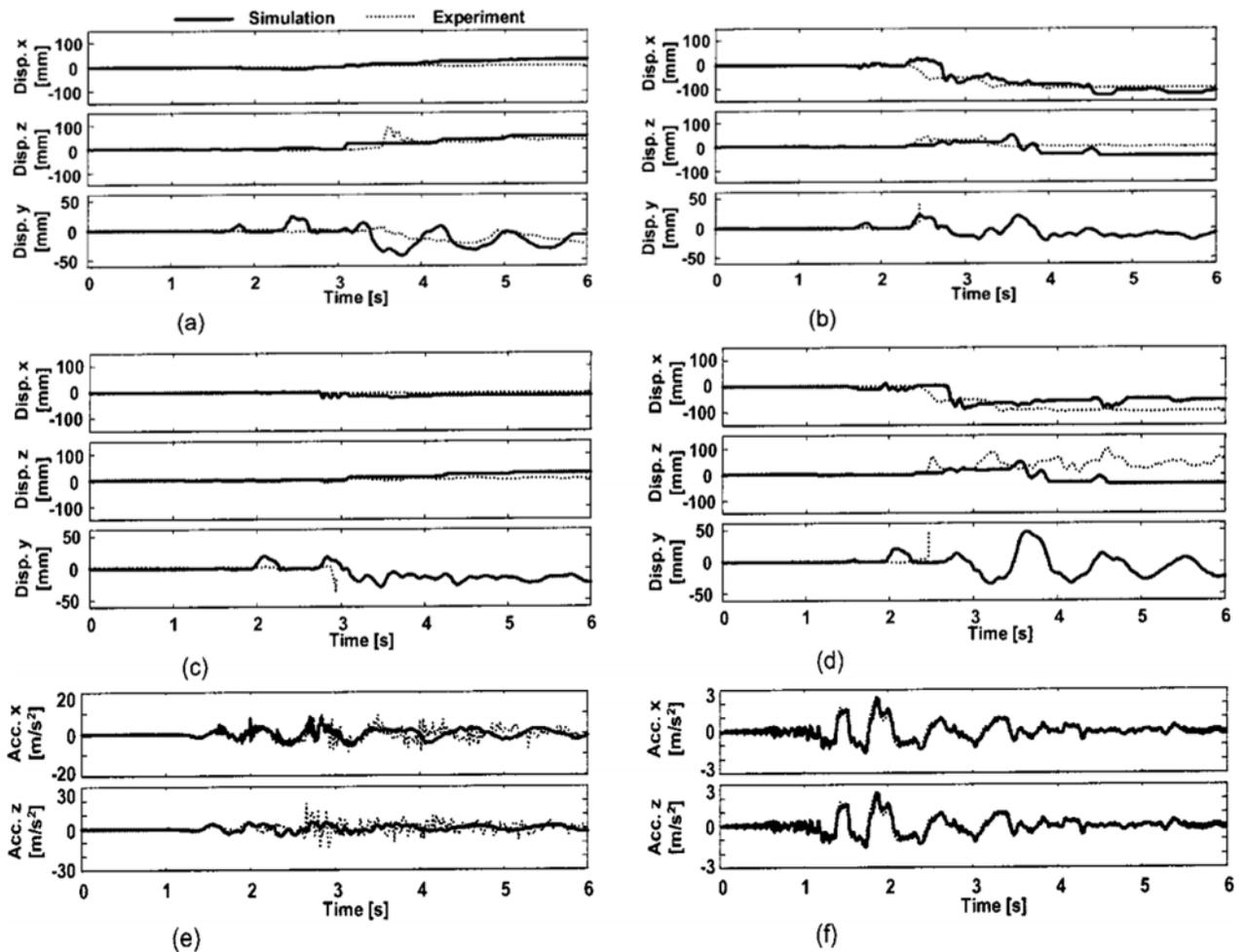


Figura 3.5: Respuesta tridimensional del modelo – Componente NS Kobe Port Island.

3.1.1.3. Evaluación del desempeño sísmico de grúas de contenedores

- Antecedentes

El tercer estudio presentado se titula “Evaluación del desempeño sísmico de grúas de contenedores que permiten levantamiento”, en este trabajo se “desarrollan metodologías para modelar de manera realista el efecto del levantamiento, que sirvan como base para el diseño y evaluación de grúas de contenedores nuevas y existentes” (Kosbab, 2010). Las teorías de levantamiento planteadas en esta investigación son verificadas con modelos detallados de elementos finitos y pruebas experimentales de una grúa STS a escala sobre mesa vibratoria.

El modelo a escala reducido en 1/20 es materializado en acero. La gravedad es un componente importante en la respuesta de levantamiento, por lo que su factor de escala es 1:1. Asimismo, el factor de escala del módulo elástico es 1:1. La Tabla 3.2 muestra los factores de escala utilizados en los experimentos, que son calculados a partir de los previamente mencionados.

Tabla 3.2: Factores de escala utilizados.

Parámetro	Factor
Largo	20
Módulo elasticidad	1
Aceleración	1
Masa	400
Tiempo	$\sqrt{20}$

Las dimensiones del modelo experimental de la grúa STS en el estudio se muestran en la Figura 3.6, se observa que la viga principal es de 6.7 metros de largo, mientras que la grúa tiene una altura de 3.35 metros. La Figura 3.7 corresponde al modelo a escala construido (real) sobre la mesa vibratoria. En el modelo físico de la grúa STS de 100 pies de trocha de última generación, se aprecia el mejoramiento del diseño con un pórtico inferior transversal reforzado que impide el colapso de la grúa STS estando sobre el tablero del muelle.

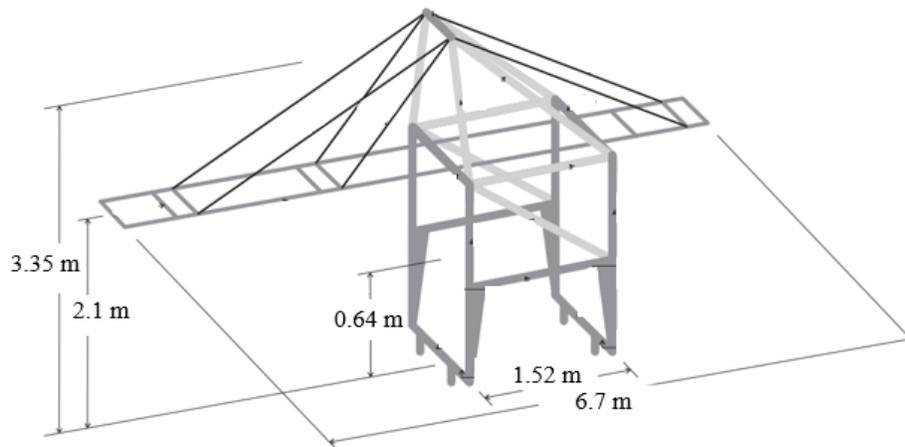


Figura 3.6: Dimensiones del modelo experimental.



Figura 3.7: Modelo a escala reducido sobre mesa vibratoria.

Para medir la respuesta de la estructura se utilizan 56 acelerómetros, 25 potenciómetros lineales, 96 medidores de tensión y 4 celdas de carga. Por otra parte, los registros de aceleración utilizados en el experimento corresponden a los mostrados en la Tabla 3.3, los que son escalados a 1/6, 1/4, 1/2, 3/4 y 1.

Tabla 3.3: Registros de aceleración utilizados en el experimento.

Set	Terremoto	Estación	Magnitud Mw	Distancia [km]
OLE1	1979 Imperial Valley	EC CO Center FF	6.5	7.6
OLE2	1992 Erzikan	Erzikan	6.9	2
CLE1	1999 Duzce	Lamont 1059	7.1	4
CLE2	1940 Imperial Valley	El Centro	7	6
LP	1989 Loma Prieta	CGS 58475	6.9	88

- Respuesta sísmica

Los resultados que se presentan a continuación están asociados a los registros de aceleración del set CLE1. El comportamiento de la grúa STS está representado en la Figura 3.8 y se puede describir de la siguiente manera: A partir del segundo 3 comienza un ligero balanceo de la grúa, el que es seguido en el segundo 6 por un levantamiento y desplazamiento de las ruedas lado tierra hacia el exterior de los rieles (sector tierra). Después, el balanceo se invierte produciendo que las ruedas lado mar se levanten y desplacen hacia el sector entre los rieles (segundo 6.2 aproximadamente). Este proceso se repite en los segundos posteriores, por lo que las ruedas lado mar y lado tierra se desplazan aún más hacia el sector tierra.

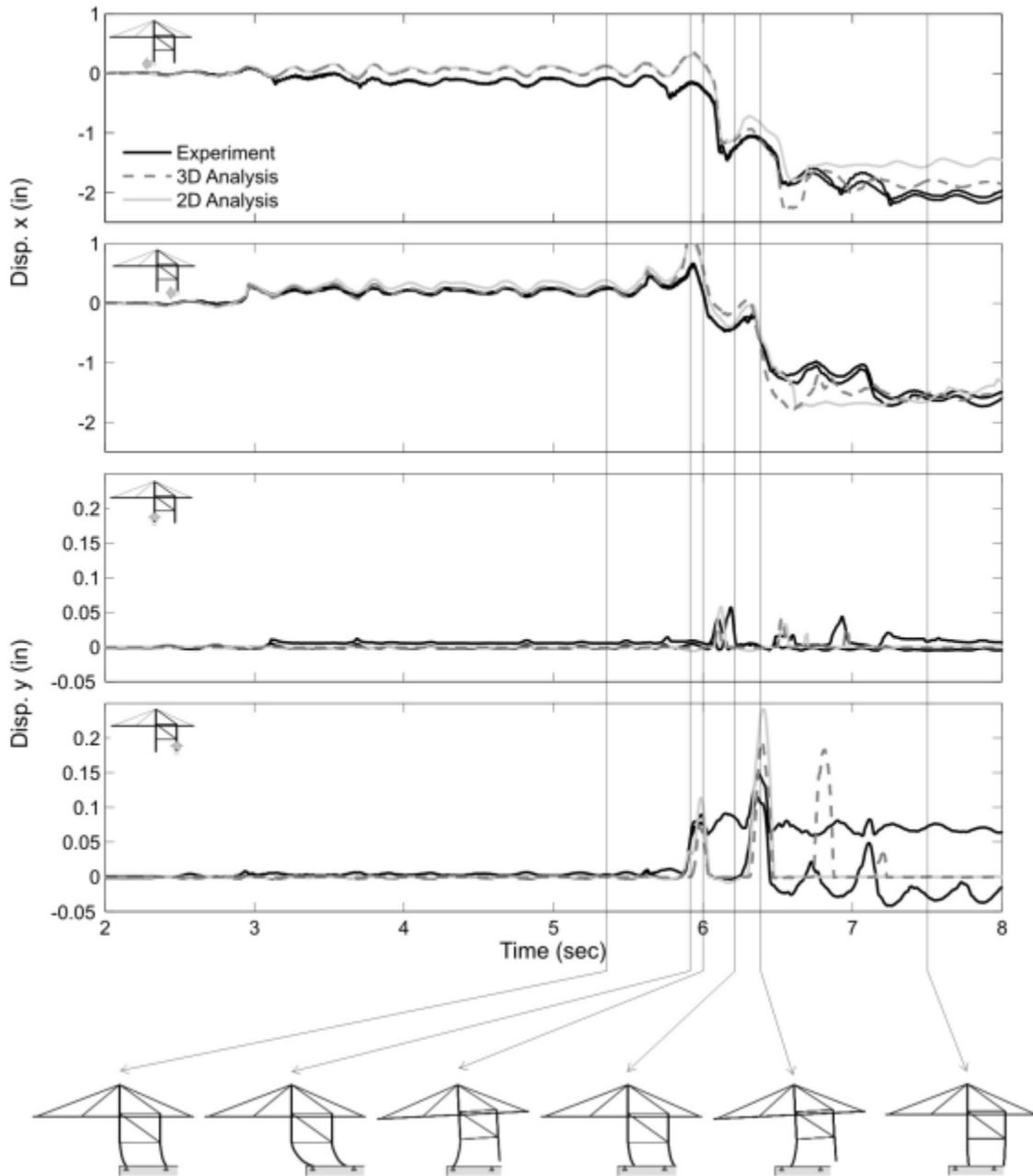


Figura 3.8: Respuesta en términos de desplazamientos transversales y verticales de apoyos lado mar y lado tierra.

3.1.1.4. Conclusiones de las investigaciones

Conocer la respuesta sísmica de las grúas de contenedores es importante para evaluar su seguridad. En el presente Capítulo se han presentado investigaciones que estudian de manera experimental el descarrilamiento de las ruedas de las grúas STS. La forma en que estos trabajos abordan el problema es similar, aplican registros de aceleraciones a un modelo a escala reducido de la estructura sobre una mesa vibratoria.

El comportamiento de las grúas STS depende del evento sísmico, específicamente la amplitud y duración del movimiento de mayor energía del registro. Por otra parte, “la magnitud del movimiento traslacional es sensible a la duración del levantamiento de las ruedas y a la respuesta del comportamiento estructural elástico” (Kosbab, 2010).

Debido a lo previamente mencionado, determinar con exactitud la magnitud del levantamiento y desplazamiento horizontal de las ruedas de las grúas STS es complejo y requiere de información específica. No obstante lo anterior, en todos los casos, las ruedas del lado tierra se levantan y desplazan primero hacia el sector mar (entre los rieles).

A partir de los trabajos de investigación presentados en la presente sección, se concluye que las ruedas de las grúas STS se levantan y desplazan horizontalmente en eventos sísmicos importantes. Por lo que el fenómeno del total descarrilamiento es confirmado por los estudios con modelos físicos de las grúas STS para las condiciones del sismo de diseño de la norma NCh2369 – “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”.

3.1.2. Casos de descarrilamiento

3.1.2.1. Kobe, Japón

El 17 de enero de 1995 ocurrió un terremoto de magnitud 6.9 Mw con epicentro a 20 kilómetros de distancia de la ciudad de Kobe, Japón, a 16 kilómetros de profundidad. En los puertos de la ciudad de Kobe hubo un gran daño en infraestructura, viéndose afectadas las grúas de contenedores. Tal como muestra la Figura 3.9, algunas grúas STS presentaron fallas en sus columnas, mientras que en otras el sistema de ruedas (bogies) presentó levantamiento y, por consiguiente, descarrilamiento (Kobayashi, Kuribara, Honda, & Watanabe, 2004).

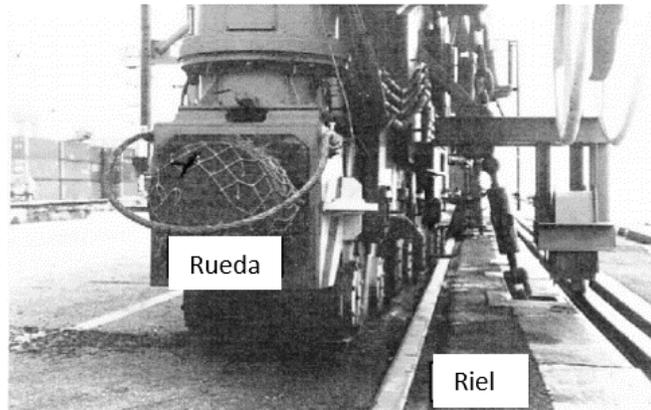


Figura 3.9: Descarrilamiento de grúa STS en Kobe, Japón, 1995. (Fuente: *Nonlinear seismic responses of container cranes including the contact problem between wheels and rails*).

3.1.2.2. Región de Valparaíso, Chile

El sábado 27 de febrero de 2010 ocurrió un terremoto de magnitud 8.8 Mw con epicentro a 150 kilómetros al noroeste de Concepción y 63 kilómetros al suroeste de Cauquenes, a 30.1 kilómetros de profundidad. Posterior al evento sísmico principal, un tsunami azotó las costas de gran parte de la zona centro – sur del país.

En San Antonio, a más de 330 kilómetros del epicentro del terremoto, debido al evento excepcionalmente severo se produjo el descarrilamiento de una grúa STS. La Figura 3.10 muestra fotografías capturadas horas después del terremoto en el frente de atraque T1, EPSA.



Figura 3.10: Descarrilamiento de grúa STS en San Antonio, Chile, 2010. (Fuente: *CONEIC XXII*).

Tal como se aprecia en las fotografías, el descarrilamiento fue de algunos centímetros, por lo que no se lamentaron pérdidas de vidas humanas, ni grandes daños a la infraestructura portuaria. Sin embargo, el hecho de que haya ocurrido el descarrilamiento de una grúa STS, a más de 330 kilómetros de distancia del epicentro del terremoto, es un indicador del riesgo que supone la ocurrencia del sismo de diseño.

3.1.2.3. Palu, Indonesia

El viernes 28 de septiembre de 2018 ocurrió un terremoto magnitud 7.5 Mw con epicentro a 78 kilómetros al norte de Palu, Indonesia, a 10 kilómetros de profundidad. Palu es una ciudad con más de 300.000 habitantes y está ubicada en la isla de Célebes (Sulawesi) en Indonesia.

A 22 kilómetros al norte de Palu, se encuentra ubicado un puerto de contenedores: el puerto de Pantoloan. Informes de testigos y un video tomado por CCTV confirman que una grúa STS colapsó durante el terremoto del 28 de septiembre de 2018. A continuación, se muestran imágenes de la grúa colapsada, la mayor parte del daño visible ocurrió cuando la grúa al desplazarse más de 10 metros sobre el tablero colapsó al caer por el borde del muelle al mar. La grúa no estaba en operación en el momento del terremoto, por lo tanto no hubo que lamentar pérdida de vida del operador en la cabina de mando.



Figura 3.11: Colapso de grúa STS en Palu, Indonesia, 2018. (Fuente: SIOP Talcahuano 2018).

3.1.3. Consecuencias del descarrilamiento

La estructuración de los puertos de contenedores considera grúas STS situadas sobre rieles que permiten su desplazamiento a lo largo del muelle. Generalmente, la distancia entre el riel lado mar y el borde del muelle es de entre 2 a 3 metros (Figura 3.12). Por lo tanto, el descarrilamiento de una grúa STS, especialmente hacia el lado mar, significa un riesgo real de colapso de estas estructuras por el borde del tablero.



Figura 3.12: Distancia riel lado mar – borde muelle y ubicación de cabina de mando.

Las grúas STS son controladas por un operador en la cabina de mando a unos 50 metros de altura (Figura 3.12). Cuando ocurre un evento sísmico, no hay manera que el operador pueda descender al tablero del muelle y evacuar. Dicho en otras palabras, para el sismo de diseño el operador debe permanecer en la cabina durante todo el terremoto. Por lo anterior, el descarrilamiento y el riesgo de colapso de una grúa STS pone en peligro la vida de una persona, contraviniendo un principio básico de la normativa sísmica industrial chilena.

Por otra parte, “los grandes equipos móviles son especialmente importantes en una industria, tanto porque su costo es muy alto como porque una falla puede significar largas paralizaciones” (Instituto Nacional de Normalización, 2003). Por ende, en términos de operación, no es aceptable el descarrilamiento total de una grúa STS.

Por último, las cargas producidas por las grúas STS son principalmente soportadas y transferidas hacia los pilotes por las vigas longitudinales situadas bajo los rieles. Por lo tanto, el descarrilamiento de una grúa de contenedores sobre el tablero de hormigón, significa que las ruedas de una grúa podrían actuar sobre losas del tablero o losa de transición del muelle con la explanada, con lo cual se ocasionan cargas para las cuales estas estructuras no han sido diseñadas.

3.2. Revisión de normativa

3.2.1. Normativa sísmica chilena

Los muelles son obras de tipo marítimo-portuarias de carácter industrial, por lo que en Chile su diseño sísmico se realiza cumpliendo las disposiciones normativas de la norma NCh2369 Of.2003 “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”.

3.2.1.1. NCh2369

La versión oficial de esta norma no dispone disposiciones específicas para estructuras marítimo-portuarias. Sin embargo, establece requisitos importantes que están relacionados con la estabilidad de grandes equipos móviles, señalando en comentarios el comportamiento de las grúas portal en puertos durante los terremotos de Valdivia 1960 y Lolleo 1985.

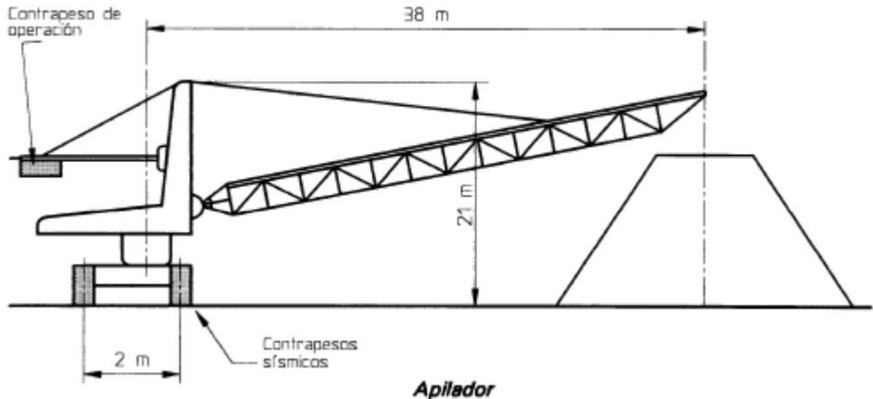
En la actualidad la norma NCh2369 se encuentra en proceso de actualización, incorporando nuevas disposiciones y capítulos. El Capítulo 13 de “Estructuras marítimas de tipo muelle transparente” incorpora de manera explícita requisitos mínimos aplicables a las estructuras marítimo-portuarias.

A continuación, se citan las disposiciones de la norma NCh2369 actualizada en trabajo que tienen relación con el problema del descarrilamiento.

Tabla 3.4: Disposiciones de la norma NCh2369 actualizada relacionadas con el descarrilamiento.

Capítulo	Disposiciones NCh2369 (actualizada)
13	Estructuras marítimas de tipo muelle transparente
13.16	<p>Como parte del diseño estructural, deben realizarse estudios específicos tendientes a evaluar la estabilidad de las grúas u otros equipos importantes (cargadores, descargadores, etc.) que operen sobre los tableros de muelles durante eventos sísmicos severos. Para esto, los modelos de análisis deben considerar de manera explícita las propiedades estructurales y dinámicas de los equipos importantes. En general, se deben utilizar modelos integrados que representen de buena forma la interacción entre los equipos y el tablero, y que en caso de existir permitan evaluar el desempeño de topes sísmicos, anclajes u otro elemento cuyo fin sea entregar estabilidad ante eventos sísmicos.</p> <p>En ausencia de un análisis de desempeño estructural del muelle (de tipo tiempo-historia no lineal) se acepta como indicador de estabilidad suficiente el que no se produzcan tracciones netas en los apoyos de los equipos para un análisis modal espectral que considere la demanda sísmica establecida por el espectro elástico (R=1,0) de referencia.</p> <p>Para otros casos debe evaluarse mediante análisis de desempeño el potencial descarrilamiento de los equipos. En general puede aceptarse el descarrilamiento parcial de un equipo móvil, mientras se garantice la integridad estructural del tablero y el equipo no presente riesgo de volcamiento o caída desde el tablero. No debe aceptarse el descarrilamiento total (todos los apoyos) de equipos.</p>

<p>C13.16</p>	<p>La continuidad operacional de las instalaciones portuarias comúnmente requiere la ausencia de daños en los equipos cargadores o descargadores de barcos. Por este motivo, y aún cuando el diseño de dichos equipos no se encuentra dentro del alcance de esta norma, es necesario imponer condiciones mínimas de análisis conjunto que permitan al diseñador del muelle detectar inconvenientes importantes en caso de existir.</p> <p>Existen dos temas fundamentales en la evaluación de la suficiencia estructural de equipos mayores. El primero, es que el equipo debería contar con la resistencia suficiente para no requerir reparaciones mayores luego de un sismo severo. El segundo, tiene relación directa con la estabilidad lateral de los equipos bajo condiciones sísmicas severas. En general no es deseable el levantamiento de los apoyos de las grúas portuarias, debido a las concentraciones de carga que se pueden producir tanto en el muelle como en el equipo, además de la compleja predicción de un potencial descarrilamiento. Sin embargo, en algunas ocasiones no es posible evitar un levantamiento únicamente a través de la respuesta estructural esperada del conjunto muelle-grúa. Es en estos casos en que vale la pena estudiar mejoras como por ejemplo anclajes, incorporación de disipadores de energía al interior del equipo o en sus bogies, entre otros.</p> <p>Es importante aclarar que el levantamiento de apoyos (tracción vertical para efectos de “modelo”) de los equipos corresponde a una falla que no presenta ningún tipo de ductilidad o sobrerresistencia asociada. Por este motivo un análisis sísmico del conjunto en base a cargas reducidas carece de sentido físico para este fin. Sólo puede estudiarse la estabilidad del equipo sobre el muelle a partir de estudios que puedan estimar cargas y deformaciones laterales “realistas”. Estas cargas pueden ser estimadas de buena forma a partir de análisis de desempeño (THNL) realizados para grupos de registros “representativos” de la demanda sísmica esperada. Sin embargo, se propone como alternativa simplificadora la evaluación de la suficiencia de la estabilidad del equipo a través de análisis elástico modal espectral tradicional. Esto se debe a que, en el caso de muelles flexibles, la evaluación de la estabilidad de la grúa para una sollicitación sísmica representada por el espectro elástico de referencia resulta de muy buena calidad, ya que no se esperan mayores incursiones inelásticas. Por el contrario, en el caso de muelles rígidos, esta metodología simplificada podría resultar conservadora en el entendido que las incursiones inelásticas de la subestructura pueden disminuir la sollicitación lateral a nivel del equipo (entregando mayor estabilidad), situación que el análisis elástico no detectaría.</p> <p>Se aclara que los análisis cuyo objetivo es la evaluación de estabilidad no entregan necesariamente resultados representativos para otro tipo de verificaciones. En particular, no es requerido considerar los esfuerzos generados de esta forma como representativos de un nivel de diseño por resistencia estándar.</p>
---------------	---

15.6	Grandes equipos móviles
15.6.1	<p>Los grandes equipos móviles como cargadores y descargadores de material a granel, apiladores, grúas portal y similares se deben analizar dinámicamente, considerando la magnitud y las posiciones más desfavorables de las cargas. Para el análisis se puede suponer que las ruedas o carros de ruedas están articuladas en los rieles o en la infraestructura de soporte.</p> <p>Se puede considerar los carros de ruedas parcialmente articulados en los rieles o en el total de ellos, pero si hay levantamiento que pueda provocar el total descarrilamiento de las ruedas del riel, se deben colocar contrapesos y/o anclajes móviles, o sistemas de aislación sísmica para evitarlo (Figura 3.13).</p>  <p style="text-align: center;">Apilador</p> <p><i>Figura 3.13: Esquema de ubicación de contrapesos para evitar levantamiento. (Fuente: NCh2369 actualizada)</i></p>
C15.6.1	<p>Los grandes equipos móviles son especialmente importantes en una industria, tanto porque su costo es muy alto como porque una falla puede significar largas paralizaciones. Tienen a menudo dimensiones apreciables y cargas muy excéntricas. Por estas razones el diseño sísmico es crítico y se deben establecer sistemas de coordinación y aprobación adecuados entre los proveedores y los especialistas sísmicos a lo largo de todo el proyecto, hasta la puesta en servicio.</p> <p>El diseño, considerando la condición real de apoyo entre las ruedas y los rieles, con posibilidades de choque y levantamiento, tiene incertidumbres que en la práctica no hacen posible establecer un modelo de análisis representativo. Por esta razón, se supone normalmente que dichos apoyos son articulaciones para los efectos de análisis y se toman precauciones como los contrapesos y/o anclajes móviles para evitar los levantamientos, impactos y total descarrilamiento.</p> <p>Las disposiciones anteriores han dado buenos resultados en la práctica chilena. La mayoría de los equipos así protegidos no han tenido fallas, con excepción de algunos casos de golpes sucesivos (zapateo) que han causado daños reparables en las ruedas y carros o el descarrilamiento parcial del equipo. Para el dimensionamiento de los contrapesos y anclajes móviles es habitual aplicar un factor de seguridad del orden de 1.0 a 1.2 en un análisis dinámico.</p> <p>En el análisis dinámico se deben considerar aceleraciones verticales y horizontales y determinar, en conjunto con los Operadores, las sobrecargas probables durante la ocurrencia del sismo.</p>

	El volcamiento total por la acción sísmica no es una posibilidad real debido a la alternación de las cargas y no es necesario considerarlo en el diseño. En los terremotos chilenos de mayo de 1960 y de marzo de 1985, hubo caída de grúas portal en los puertos de Puerto Montt y de San Antonio, que se debieron a grandes asentamientos de suelo (licuación) y no a las fuerzas sísmicas horizontales.
15.6.2	Para disminuir las posibilidades de choque entre las pestañas de los rieles y las ruedas, el sistema debe ser autocentrante.
15.6.3	Se debe prestar especial atención a los efectos de excentricidad sísmica que se producen en estos sistemas.

4. ANTECEDENTES

El propósito de este Capítulo es presentar de manera general los antecedentes y parámetros iniciales considerados para realizar la modelación de las estructuras, estos corresponden a la ubicación del proyecto, la nave de diseño, las dimensiones generales de las estructuras y las disposiciones normativas que aplican al proyecto estudiado.

El desarrollo de cuestiones más específicas, tales como dimensiones de vigas transversales, vigas longitudinales, pilotes, la materialidad de estos y el detalle de la información referente a la mecánica de suelos son descritos en profundidad en el Capítulo 5 – Modelación de Estructuras.

4.1. Localización del proyecto

El proyecto está ubicado en la ciudad de Valparaíso, Región de Valparaíso, Chile, corresponde al frente de atraque N° 2 del Puerto de Valparaíso.

El puerto de Valparaíso es uno de los más importantes a nivel nacional, principalmente debido a la transferencia de carga en contenedores. Posee 8 sitios de atraque para embarcaciones, los sitios 1, 2, 3, 4 y 5 son administrados por T.P.S (Terminal Pacífico Sur), mientras que los sitios 6, 7 y 8 los administra T.C.VAL (Terminal Cerros de Valparaíso).

La Figura 4.1 muestra los sitios en operación en la actualidad y la ubicación del frente de atraque N°2 considerado en el trabajo.



Figura 4.1: Ubicación de sitios 1 al 8 y del frente de atraque N°2 – Valparaíso, Chile.

4.2. Nave de diseño

La nave de diseño es uno de los parámetros considerados para llevar a cabo el diseño de las estructuras portuarias, muelle y grúas STS. En este caso, la nave de diseño corresponde a un buque Súper Post Panamax clase triple E, el cual tiene las siguientes dimensiones:

Tabla 4.1: Dimensiones generales de la nave de diseño.

Tipo de nave	Súper Post Panamax
Eslora [m]	400
Manga [m]	59
Calado [m]	15.5
Capacidad [TEU]	18000

4.3. Mecánica de suelos

En el desarrollo del modelo del muelle se considera la información contenida en el informe de mecánica de suelos del sitio en el que está ubicado el proyecto “Frente de Atraque N° 2 del Puerto de Valparaíso”. Esta información fue facilitada por la empresa PMI Energy Services.

La información utilizada es principalmente la clasificación sísmica del suelo de fundación, necesaria para elaborar el análisis sísmico de las estructuras. Adicionalmente, las constantes de balasto horizontales suelo – pilote son incluidas en el modelo mediante resortes de rigidez variable con la profundidad.

En la sección 5.2.4 se detalla la estratigrafía y las constantes de balasto utilizadas para ejecutar la modelación del suelo de fundación.

4.4. Descripción general de las estructuras

4.4.1. Grúa STS

La grúa STS considerada en el estudio corresponde a la que generalmente es operada en puertos que reciben naves Súper Post Panamax. Sus principales características son que posee 100 pies (30.48 metros) de trocha, la viga principal tiene un alcance que puede superar los 70 metros, la altura a la que opera la cabina es de 49 metros de altura, entre otros.

4.4.2. Frente de atraque

En este trabajo se estudia el comportamiento sísmico de un sitio de atraque con capacidad de recibir la nave de diseño, que tal como se mencionó previamente, tiene una eslora de 400 metros. Por lo tanto, las dimensiones del muelle son: 432.5 metros de largo y 36.13 metros de ancho.

El frente de atraque corresponde a un muelle transparente en el que el tablero, las vigas longitudinales y las vigas transversales son de hormigón, mientras que los pilotes son de acero. La Figura 4.2 muestra un esquema del frente de atraque.

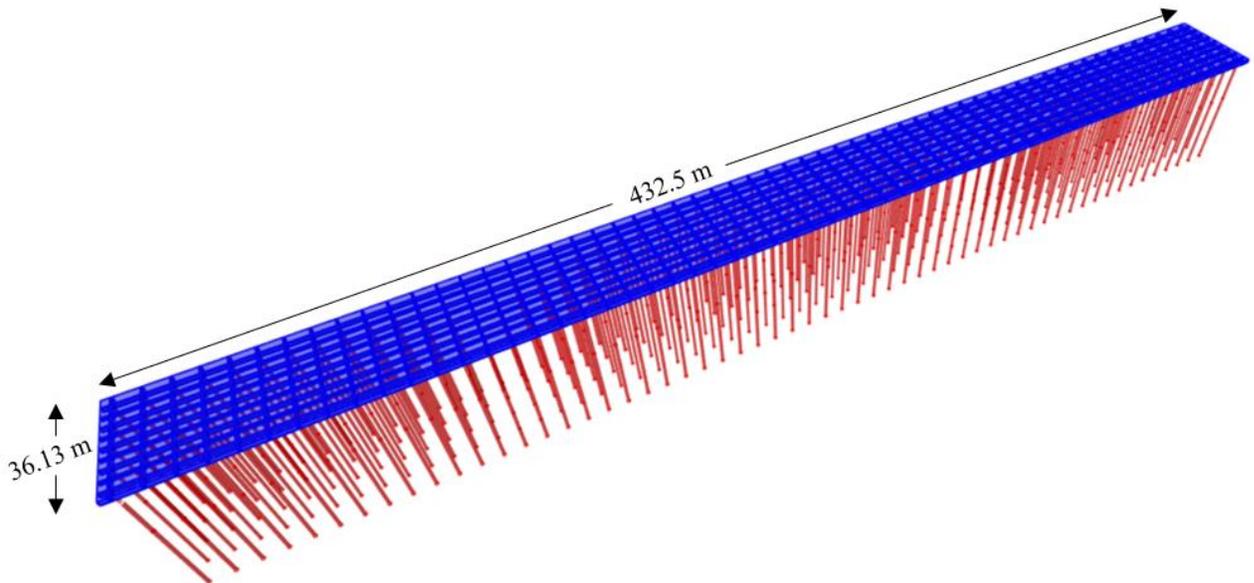


Figura 4.2: Dimensiones generales del muelle modelado.

4.5. Disposiciones normativas

La normativa sísmica fue aplicada en la conformación de los modelos y análisis llevados a cabo en este trabajo. A continuación, se presentan los artículos y disposiciones normativas exigidas por las normas nacionales.

4.5.1. Norma NCh2369 Of.2003 Actualizada

Los requisitos aplicados de la norma de “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales” - NCh2369 son principalmente relacionados con los capítulos de: “Disposiciones de aplicación general” (Capítulo 4), “Análisis sísmico” (Capítulo 5) y “Estructuras marítimas de tipo transparente” (Capítulo 13).

En la Tabla 4.2 se indican las disposiciones consideradas y aplicadas.

Tabla 4.2: Disposiciones de la norma NCh2369 consideradas en el trabajo.

Capítulo	Disposiciones NCh2369 Of.2003
4	Disposiciones de aplicación general
4.1.1	Las disposiciones de diseño de esta norma, aplicadas en conjunto con las normas de diseño específicas de cada material, están orientadas al cumplimiento de los siguientes objetivos: a) Protección de la vida en la industria. b) Continuidad de operación de la industria.
4.3	Clasificación de estructuras y equipos según importancia. Para los efectos de la aplicación de esta norma, las estructuras y equipos se clasifican en categorías según su importancia. - Categoría C1: Obras críticas (Vitales, peligrosas o esenciales). - Categoría C2: Obras normales. - Categoría C3: Obras y equipos menores.
4.5	Combinaciones de cargas. La combinación de las solicitaciones sísmicas con las cargas permanentes y los distintos tipos de sobrecargas se debe hacer usando las reglas de superposición incluidas en los puntos 9.1 y 9.2 de la norma NCh3171.
5	Análisis sísmico
5.1.1	Dirección de la solicitación sísmica Las estructuras deben ser analizadas, como mínimo, para las acciones sísmicas en dos direcciones horizontales aproximadamente perpendiculares. El efecto de las aceleraciones sísmicas verticales se debe considerar en todos los casos y debe ser combinado con las aceleraciones sísmicas horizontales según las combinaciones de cargas de la cláusula 4.5.

5.1.2	<p>Combinación de efectos de componentes horizontales del sismo</p> <p>Para el diseño de los elementos estructurales resistentes al sismo, en general, no es necesario combinar los efectos debidos a las dos componentes horizontales de la acción sísmica. Se puede proceder como si dichos efectos no fueran concurrentes y, en consecuencia, los elementos se pueden diseñar para el sismo actuando según cada una de las direcciones de análisis considerada separadamente.</p> <p>Hacen excepción a esta regla simplificadora las estructuras que presentan notorias irregularidades torsionales o que tienen en ambas direcciones marcos rígidos con columnas comunes a dos líneas resistentes que se intersectan. En tales casos, los elementos se deben diseñar para los esfuerzos obtenidos de considerar el 100% de la sollicitación sísmica que actúa en una dirección más los esfuerzos obtenidos de considerar el 30% de la sollicitación sísmica actuando en la dirección ortogonal a la anterior, y viceversa. Se deben considerar los mayores esfuerzos resultantes de las dos combinaciones anteriores.</p>
5.1.3	<p>Masa sísmica para el modelo estructural</p> <p>Para el cálculo de las fuerzas de inercia horizontales durante un sismo, las sobrecargas de operación se pueden reducir de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia simultánea con el sismo de diseño.</p> <p>Para calcular las acciones sísmicas horizontales y vertical, se puede despreciar la masa de la estructura bajo el nivel del suelo natural.</p>
5.2.2	<p>Métodos lineales</p> <p>Se pueden usar tres procedimientos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Análisis estático o de fuerzas equivalentes, solamente para estructuras de hasta 20 m de altura, siempre que su respuesta sísmica se pueda asimilar a la de un sistema de un grado de libertad. - Análisis modal espectral, para cualquier tipo de estructuras. - Métodos especiales, para estructuras con comportamiento elástico, de acuerdo a lo estipulado en la cláusula 5.8.
5.4.2	<p>Análisis elástico dinámico</p> <p>Espectro de diseño</p> <p>El análisis modal espectral se debe hacer para el espectro de diseño siguiente:</p> $S_a = \frac{2,75 \cdot A_0 \cdot I}{R} \cdot \left(\frac{T'}{T}\right)^n \cdot \left(\frac{0,05}{\xi}\right)^{0,4}$

5.4.6	<p>Torsión</p> <p>Los efectos de la torsión debido a variaciones de la distribución de las cargas de operación, ubicación de las sobrecargas y peso propio, deben ser considerados en el diseño estructural.</p>
5.5.2	<p>Acción sísmica vertical</p> <p>Se puede desarrollar un análisis dinámico vertical con el siguiente espectro elástico de aceleraciones, para $R=3$ y $\xi=0,03$. Razones de amortiguamiento mayores que 0,03 se deben justificar especialmente.</p> $S_{av} = \frac{1,925 \cdot A_0 \cdot I}{R} \cdot \left(\frac{T'}{1,7 \cdot T} \right)^n \cdot \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4}$ <p>No obstante, el valor de S_{av} no debe ser mayor que $S_{m\acute{a}x}$:</p> $S_{m\acute{a}x} = \frac{1,925 \cdot A_0 \cdot I}{R} \cdot \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4}$
5.8.2.1	<p>Análisis de respuesta en el tiempo</p> <p>Para la realización de los análisis de respuesta en el tiempo se deberá considerar el espectro de sitio definido en la cláusula 5.8.1.1. En el caso de no existir espectros de sitio se considerará el espectro de referencia definido en la cláusula 5.8.1.3.</p>
5.8.2.2	<p>Se deben seleccionar componentes horizontales y verticales de registros de aceleración del suelo de al menos tres eventos sísmicos. Los registros deben tener magnitudes, distancias a la falla, fuentes del mecanismo del sismo y tipos de suelo que sean consistentes con aquellos que controlan el sismo de diseño. Cuando no se disponga de componentes de registros reales, se pueden agregar registros artificiales que simulen estas condiciones.</p>
5.8.2.3	<p>Para cada par de registros horizontales se deben construir los espectros de pseudo-aceleración para $\xi=0,05$ y se deben combinar según la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS). Los registros se deben modificar de manera que el promedio de los espectros de respuesta combinados con SRSS para los tres pares de registros, no resulte menor que 1,17 veces el espectro del sismo indicado en la cláusula 5.8.1 para $\xi=0,05$ en el rango de periodos entre 0,2 T y 1,5 T, donde T es el periodo fundamental de la estructura.</p>
5.8.2.4	<p>Cuando se usen tres registros diferentes, se adoptarán para el diseño los valores máximos del parámetro de interés, obtenidos de aplicar cada uno de ellos. En esta definición se entiende por parámetro de interés la sollicitación, fuerza axial, corte, momento de flexión o la deformación obtenida para cada miembro en particular o para la estructura considerada globalmente. Cuando se realicen siete o más análisis de respuesta en el tiempo, se podrá utilizar para el diseño el valor promedio de respuesta del parámetro de interés.</p>

5.8.2.6	Los análisis de respuesta en el tiempo se deben hacer considerando las tres direcciones simultáneamente.
13	Estructuras marítimas de tipo muelle transparente
13.1	<p>El alcance del presente capítulo corresponde a estructuras ubicadas en zonas de borde marino o situaciones similares, en que el nivel de terreno se encuentre por debajo del nivel de las aguas. Las disposiciones del presente capítulo cubren el diseño sismorresistente de estructuras que cuenten con un único nivel de tablero de operaciones construido sobre pilotes que se apoyan en el fondo marino.</p> <p>Para proyectos de especial importancia, en los cuales se requiera garantizar un desempeño específico frente a uno o más niveles de solicitación sísmica, u obras cuyo daño tanto estructural como no estructural pueda comprometer la seguridad de la población o el medio ambiente se deben desarrollar y cumplir estándares de diseño más exigentes que los expuestos en la presente norma y consistentes con los objetivos que sea necesario garantizar.</p>
13.3	Aquellas estructuras cuya falla comprometa la continuidad de operación del puerto (tales como muelles de carga o descarga u otros similares) deben ser clasificadas como importantes u esenciales desde el punto de vista de su diseño sismorresistente.
13.4	Las solicitaciones sísmicas de diseño para las estructuras marítimas tradicionales (sin sistemas de protección sísmica como aislación o disipación de energía), se determinan de acuerdo a lo establecido en el capítulo 5, con las modificaciones y complementos que se indiquen en este capítulo.
13.5	El factor de modificación de respuesta y razones de amortiguamiento para diseño de estructuras marítimas específicas se debe tomar de la tabla 13.1. Los valores deben escogerse de manera que las solicitaciones sísmicas sean las más exigentes entre las opciones disponibles en la tabla y a las que pueda asimilarse la estructura. Deben utilizarse los mismos valores para los análisis en todas las direcciones horizontales aplicables y combinaciones de estas.
13.16	<p>Como parte del diseño estructural, deben realizarse estudios específicos tendientes a evaluar la estabilidad de las grúas u otros equipos importantes (cargadores, descargadores, etc.) que operen sobre los tableros de muelles durante eventos sísmicos severos. Para esto, los modelos de análisis deben considerar de manera explícita las propiedades estructurales y dinámicas de los equipos importantes. En general, se deben utilizar modelos integrados que representen de buena forma la interacción entre los equipos y el tablero, y que en caso de existir permitan evaluar el desempeño de topes sísmicos, anclajes u otro elemento cuyo fin sea entregar estabilidad ante eventos sísmicos.</p> <p>En ausencia de un análisis de desempeño estructural del muelle (de tipo tiempo-historia no lineal) se acepta como indicador de estabilidad suficiente el que no se produzcan tracciones netas en los apoyos de los equipos para un análisis modal espectral que considere la demanda sísmica establecida por el espectro elástico ($R=1,0$) de referencia.</p>

	Para otros casos debe evaluarse mediante análisis de desempeño el potencial descarrilamiento de los equipos. En general puede aceptarse el descarrilamiento parcial de un equipo móvil, mientras se garantice la integridad estructural del tablero y el equipo no presente riesgo de volcamiento o caída desde el tablero. No debe aceptarse el descarrilamiento total (todos los apoyos) de equipos.
--	--

4.5.2. Norma NCh2745 Of.2013

Las disposiciones aplicadas de la norma de “Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica” – NCh2745 están relacionadas con el espectro de diseño que está definido en el Capítulo de “Procedimientos de análisis dinámico”.

Tabla 4.3: Disposiciones de la norma NCh2745 consideradas en el trabajo.

Capítulo	Disposiciones NCh2745 Of.2013
8	Procedimientos de análisis dinámico
8.4.1.1	<p>Espectros de diseño</p> <p>Para el diseño de todas las estructuras con un periodo aislado, T_M, mayor que 3,5 s, o ubicadas en suelos tipo IV según NCh433, o ubicadas a menos de 10 km de una falla activa, se requiere de espectros específicos del sitio debidamente fundamentados.</p> <p>Las estructuras que no requieran de este tipo de espectro y para las cuales no se ha calculado un espectro específico, se deben diseñar usando el espectro indicado en la Figura 1 debidamente escalado por el factor Z de Tabla 5, y conjuntamente con los valores indicados en Tabla 6.</p>

La Figura 4.3 muestra el espectro de diseño base al cual hace mención el artículo 8.4.1.1.

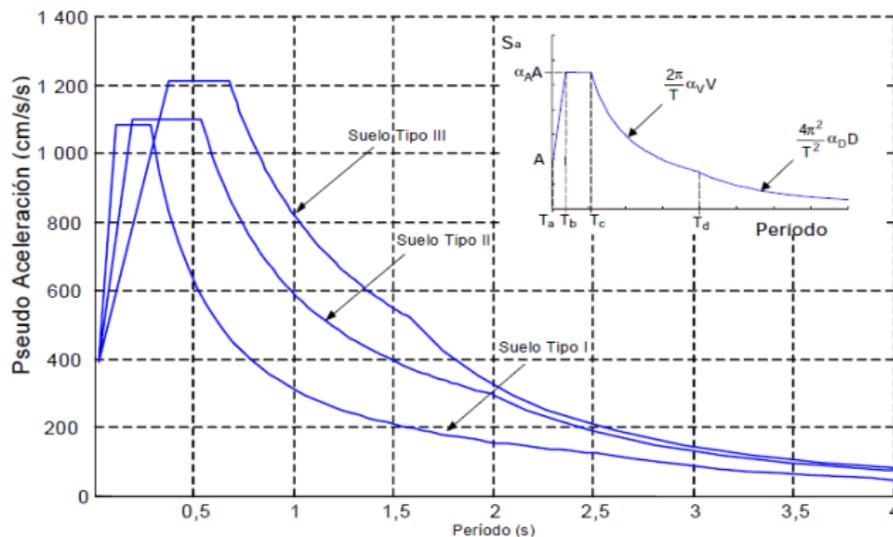


Figura 4.3: Espectro de diseño definido por la norma NCh2745. (Fuente: NCh2745 of.2013)

4.5.3. Norma NCh3171 Of.2010

Las disposiciones aplicadas de la norma de “Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de carga” – NCh3171 están relacionados con las combinaciones de carga utilizadas en el análisis sísmico de las estructuras.

Tabla 4.4: Disposiciones de la norma NCh3171 consideradas en el trabajo.

Capítulo	Disposiciones NCh3171 Of.2010
9	Combinaciones de carga
9	<p>Las combinaciones de carga y los factores de carga indicados en 9.1 y 9.2 deben ser usados cuando las normas de diseño correspondientes a los distintos materiales así lo indiquen.</p> <p>Se debe utilizar la combinación que produzca el efecto más desfavorable en el edificio, fundación o el elemento estructural considerado. En algunos casos eso puede ocurrir cuando una o más cargas en la combinación no están presentes.</p>
9.1.1	<p>Factores de combinación de carga mayoradas usando el diseño por resistencia</p> <p>Las estructuras, los elementos componentes y las fundaciones deben ser diseñados de manera que su resistencia de diseño sea mayor o igual que el efecto de las cargas mayoradas en las combinaciones siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 1,4 D 2) 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (Lr o S o R) 3) a) 1,2 D + 1,6 (Lr o S o R) + L <li style="padding-left: 20px;">b) 1,2 D + 1,6 (Lr o S o R) + 0,8 W 4) 1,2 D + 1,6 W + L + 0,5 (Lr o S o R) 5) 1,2 D + 1,4 E + L + 0,2 S 6) 0,9 D + 1,6 W 7) 0,9 D + 1,4 E
9.2.1	<p>Combinaciones de carga nominales que se usan en el método de diseño por tensiones admisibles</p> <p>Las estructuras, los elementos componentes y las fundaciones deben ser diseñados de manera que su resistencia admisible sea mayor o igual que el efecto de las cargas nominales en las combinaciones siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) D 2) D + L 3) D + (Lr o S o R) 4) D + 0,75 L + 0,75 (Lr o S o R) 5) a) D + W <li style="padding-left: 20px;">b) D + E 6) a) D + 0,75 W + 0,75 L + 0,75 (Lr o S o R) <li style="padding-left: 20px;">b) D + 0,75 E + 0,75 L + 0,75 S 7) 0,6 D + W 8) 0,6 D + E

5. MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS

En el presente Capítulo se detalla el proceso de modelado de las estructuras, lo que se desarrolló mediante el software SAP2000 versión 20. Se incluye la valoración de las cargas aplicadas, materiales y dimensiones de las estructuras, mecánica de suelos y la metodología utilizada para integrar las estructuras principales estudiadas: el muelle y la grúa STS.

Los modelos presentados son desarrollados cumpliendo las disposiciones normativas presentadas en el Capítulo anterior.

5.1. Cargas

5.1.1. Cargas muertas o permanentes

Las cargas muertas o permanentes son producidas por acción de la gravedad, incluyen el peso propio de todos los elementos que componen la estructura y el peso de columnas de agua en el interior de los pilotes.

5.1.1.1. Peso propio

Se considera el peso de todos los elementos estructurales, es decir, vigas longitudinales y transversales de hormigón armado, losa de hormigón armado y pilotes de acero (sector de estos que está sobre el nivel del suelo natural).

5.1.1.2. Columna de agua

Los pilotes de acero corresponden a elementos estructurales de sección tubular. El interior de estos contiene agua que debe considerarse en el desarrollo del análisis sísmico.

El peso producido por la columna de agua se considera en el modelo a través de una carga distribuida linealmente a lo largo del pilote (sector de estos que está sobre el nivel del suelo natural), esta carga depende del diámetro del pilote.

Tabla 5.1: Valores de columna de agua.

Elemento	Diámetro [mm]	Carga lineal [tonf/m]
Línea de pilotes de los ejes A, D Y E	1200	1.13
Línea de pilotes de los ejes B y C	1000	0.79

5.1.2. Cargas vivas o sobrecargas

5.1.2.1. Sobrecarga de uso

La sobrecarga de uso corresponde a la carga producida por el tránsito de personas, tránsito de maquinaria (vehículos, camiones, montacargas, entre otros) sobre el tablero de la estructura, cargas de operación y mantenimiento de la estructura.

El valor de la sobrecarga de uso fue estipulado a partir de bases de diseño de proyectos similares. Esta sobrecarga se aplica como carga vertical distribuida sobre el tablero de hormigón armado.

Tabla 5.2: Valores de sobrecarga de uso.

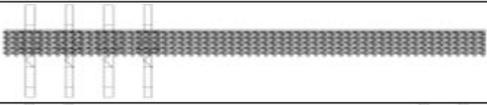
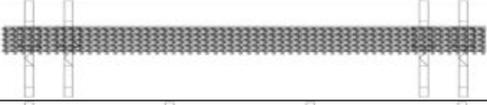
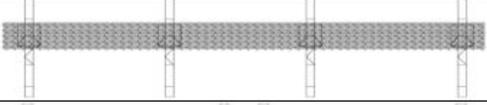
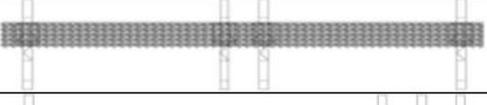
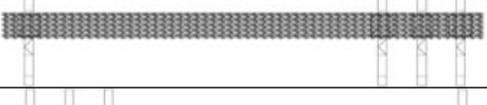
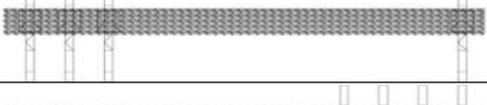
Elemento	Estática [tonf/m ²]	Sísmica [tonf/m ²]
Losa	2.5	1.25

5.1.3. Carga de equipos

Sobre el tablero del muelle se desplazan longitudinalmente grúas de contenedores. El número de grúas STS consideradas son 4, las cuales, dependiendo de la operación del puerto, se pueden situar en distintas posiciones a lo largo del muelle.

Para considerar las variaciones de ubicación de las grúas STS sobre el tablero, se analizan diferentes posiciones de estas. La Tabla 5.3 muestra los distintos casos analizados en función de la posición de las grúas.

Tabla 5.3: Posición de grúas STS en casos analizados.

Posición	Referencia
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

5.1.4. Cargas sísmicas

El análisis sísmico se realiza usando métodos lineales para una acción sísmica que se puede especificar a través de las formas siguientes:

- Mediante coeficientes sísmicos horizontales y verticales.
- Mediante espectros de respuesta de sistemas lineales para movimientos de traslación horizontal y vertical del suelo de fundación.
- Dando valores descriptivos del movimiento del suelo (máximos de la aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo en la dirección horizontal y vertical)
- Mediante acelerogramas reales o sintéticos debidamente formulados para los movimientos horizontal y vertical del suelo de fundación.

En este trabajo, las cargas sísmicas son consideradas por medio de espectros de respuesta y acelerogramas reales. En otras palabras, se realizan análisis elástico dinámico o modal – espectral y análisis de respuesta en el tiempo o tiempo – historia.

5.1.4.1. Análisis Modal – Espectral

A continuación, se presentan los parámetros sísmicos utilizados para determinar el espectro de diseño establecido por la disposición 5.4.2 de la norma NCh2369 actualizada, el cual está definido por la siguiente expresión:

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

Donde el valor de S_a no debe ser mayor que $S_{a,máx}$:

$$S_{a,máx} = I \cdot \frac{2.75 \cdot A_0}{(1 + R) \cdot g} \cdot \left(\frac{0.05}{\xi}\right)^{0.4} \cdot g$$

- Factor de importancia

El artículo 13.3 de la norma NCh2369 actualizada indica que las estructuras cuya falla comprometa la continuidad operacional del puerto deben ser clasificadas como importantes o esenciales. Por lo tanto, para el diseño sísmico del muelle se debe considerar el factor de importancia definido por la categoría C1.

$$I = 1.2$$

- Parámetros que dependen del tipo de suelo

El informe de mecánica de suelos estipula que el suelo de fundación del muelle clasifica como suelo tipo III. A partir de la norma NCh2369 actualizada, los parámetros que dependen del suelo son:

$$T' [s] = 0.62 \wedge n = 1.8$$

- **Zona sísmica**

Como se indicó anteriormente, el proyecto está ubicado en la ciudad de Valparaíso, Chile. Por lo tanto, la zonificación sísmica corresponde a la 3 y el valor de la aceleración efectiva máxima es:

$$A_0 [g] = 0.4$$

- **Factor de reducción de respuesta (R) y razón de amortiguamiento**

El factor de reducción de respuesta utilizado es 1, mientras que la razón de amortiguamiento está definida en el Capítulo 13 de la norma NCh2369 actualizada y depende del sistema sismo – resistente y el tipo de vigas utilizadas.

En particular, el muelle en estudio está clasificado como sistema sismo – resistente número 4 y se utilizan vigas de hormigón, por lo que la razón de amortiguamiento usada es $\xi = 0.04$.

- **Espectro de diseño horizontal**

A partir de los parámetros previamente mencionados, se calcula el espectro de diseño horizontal, este se muestra en la Figura 5.1.

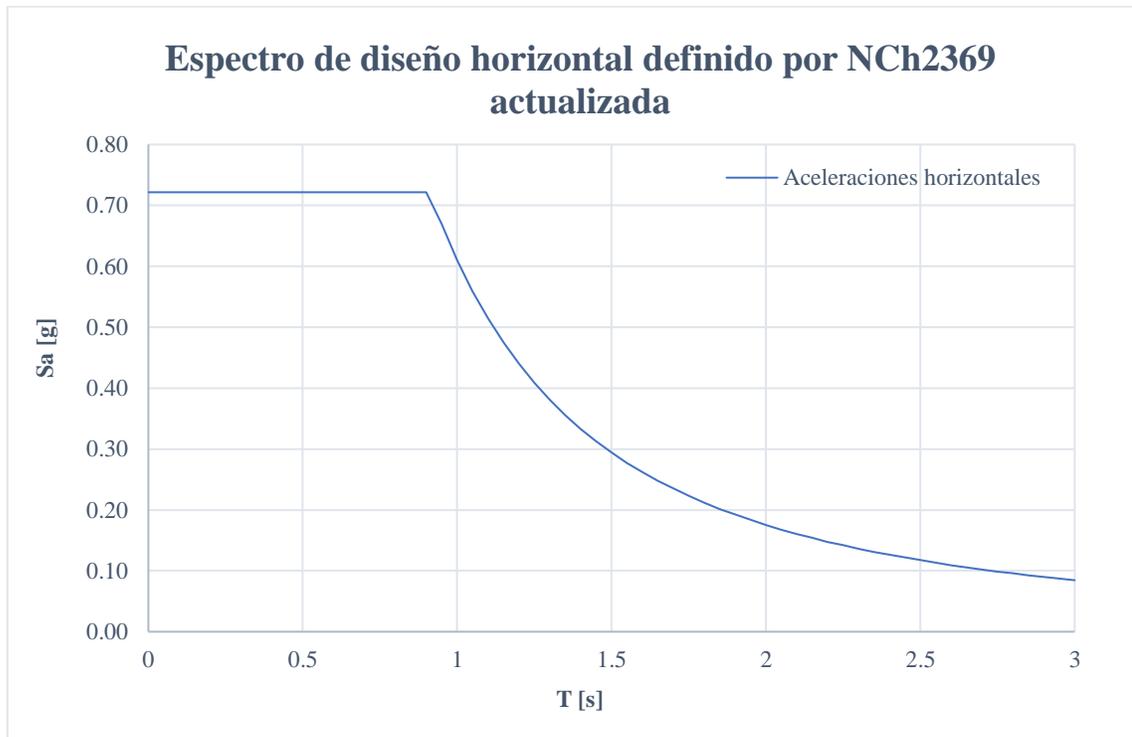


Figura 5.1: Espectro de diseño horizontal – NCh2369 actualizada.

- Demanda sísmica vertical

La demanda sísmica vertical se considera en el análisis mediante el análisis dinámico vertical establecido en la disposición 5.5.2 de la norma NCh2369 actualizada, el cual está definido por la siguiente expresión:

$$S_{av} = \frac{1,925 \cdot A_0 \cdot I}{R} \cdot \left(\frac{T'}{1,7 \cdot T} \right)^n \cdot \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4}$$

Donde el valor de S_{av} no debe ser mayor que $S_{m\acute{a}x}$:

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{1,925 \cdot A_0 \cdot I}{R} \cdot \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4}$$

En el cálculo del espectro de diseño vertical, el factor de importancia (I), los parámetros que dependen del suelo ($T' \wedge n$) y la zonificación sísmica (A_0) corresponden a los mismos valores utilizados para calcular el espectro de diseño horizontal. Sin embargo, de acuerdo a lo estipulado en la disposición 5.5.2 de la norma NCh2369 actualizada, el factor de reducción de respuesta (R) y la razón de amortiguamiento (ξ) se deben modificar a los siguientes valores:

$$R = 3 \wedge \xi = 0.03$$

La Figura 5.2 muestra el espectro de diseño del análisis dinámico vertical.

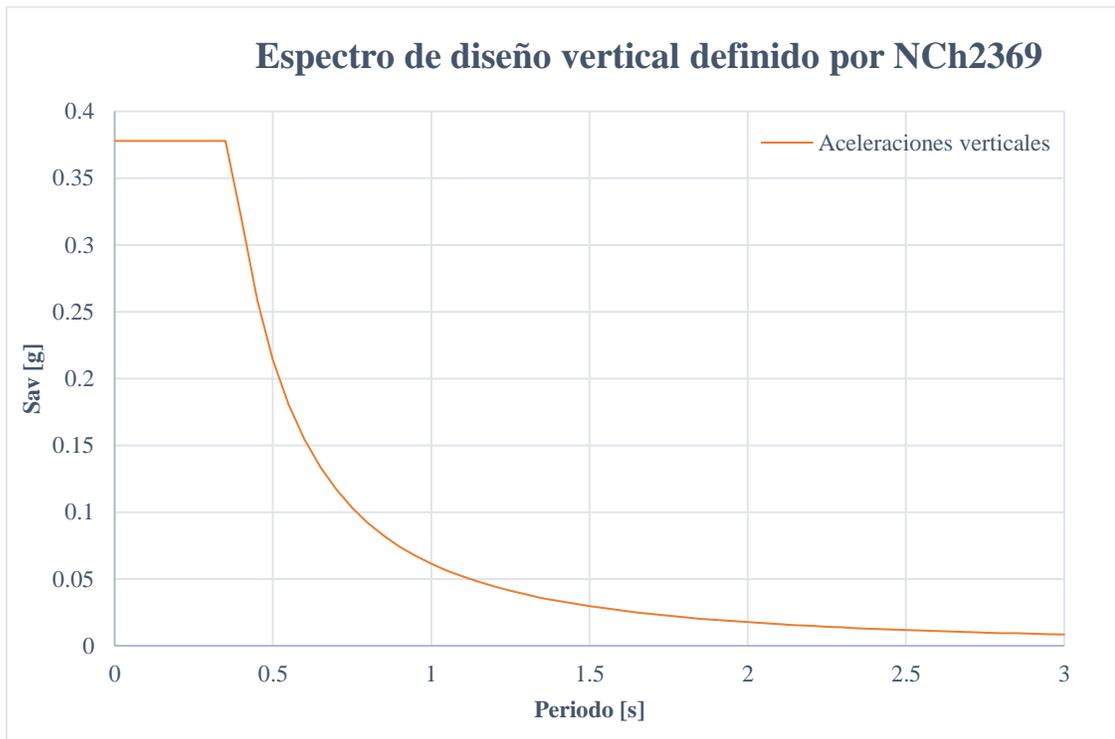


Figura 5.2: Espectro de diseño vertical - NCh2369 actualizada.

5.1.4.2. Análisis Tiempo – Historia

El análisis tiempo – historia aplicado al modelo considera las condiciones impuestas por las secciones 5.8.1 – “Análisis especiales” y 5.8.2 – “Análisis de respuesta en el tiempo” de la norma NCh2369 actualizada.

- Espectro de referencia

A partir de la disposición 5.8.2.1 de la norma NCh2369 actualizada, el espectro de referencia corresponde al espectro elástico de la norma NCh2745, para el sismo de diseño (SDI), calculado para la zona sísmica y el tipo de suelo del sitio del proyecto. Los parámetros utilizados para determinar el espectro elástico de la norma NCh2745 se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Factores para determinación de espectro NCh2745.

Factor	Valor
Z	5/4
T_a	0.03
T_b	0.375
T_c	0.68
T_d	1.58
$\alpha_a A$	1212
$\alpha_v V$	131
$\alpha_d D$	33

- Registros de aceleración

Se seleccionan las componentes horizontales y verticales de registros de aceleración de los siguientes eventos sísmicos: Constitución 2010, Matanzas 2010 y Llolleo 1985.

La Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5 muestran los registros de aceleraciones del evento Constitución 2010 en sus tres componentes.



Figura 5.3: Registro de aceleraciones – Constitución 2010, Componente L.

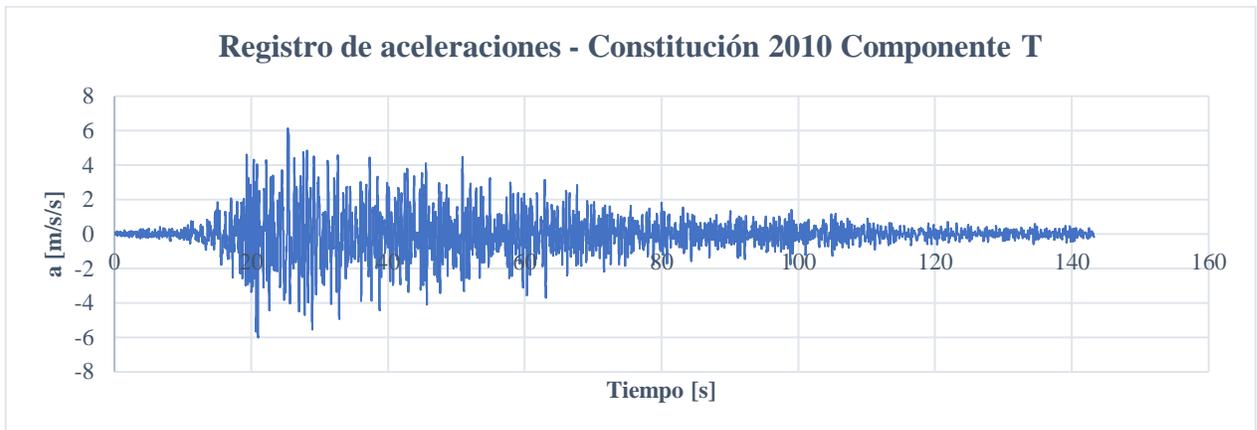


Figura 5.4: Registro de aceleraciones – Constitución 2010, Componente T.

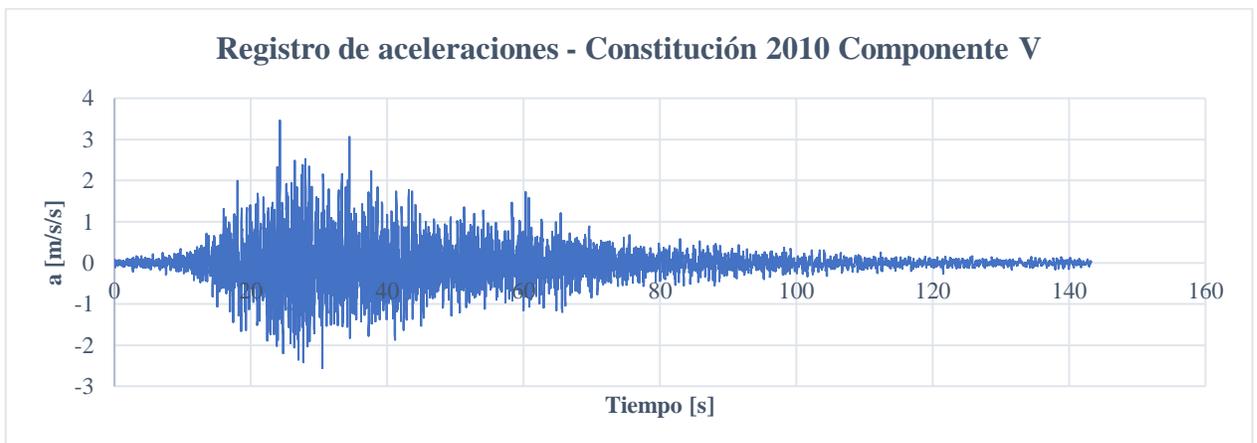


Figura 5.5: Registro de aceleraciones – Constitución 2010, Componente V.

La Figura 5.6, Figura 5.7 y Figura 5.8 muestran los registros de aceleraciones del evento Matanzas 2010 en sus tres componentes.

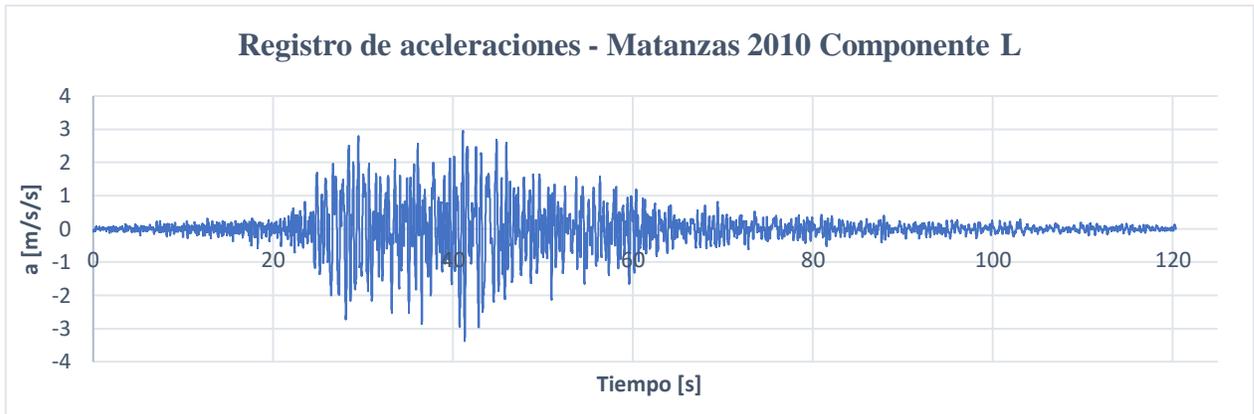


Figura 5.6: Registro de aceleraciones – Matanzas 2010, Componente L.

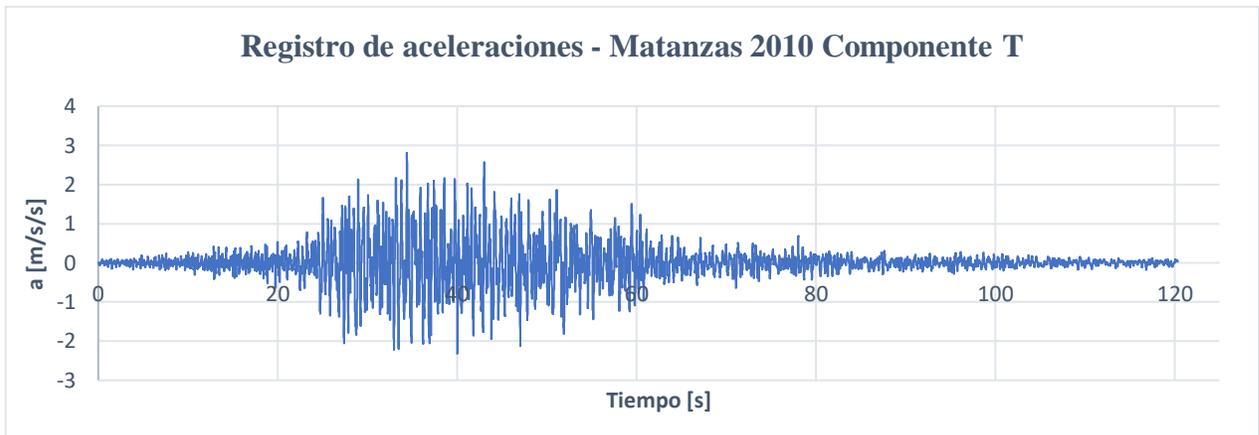


Figura 5.7: Registro de aceleraciones – Matanzas 2010, Componente T.

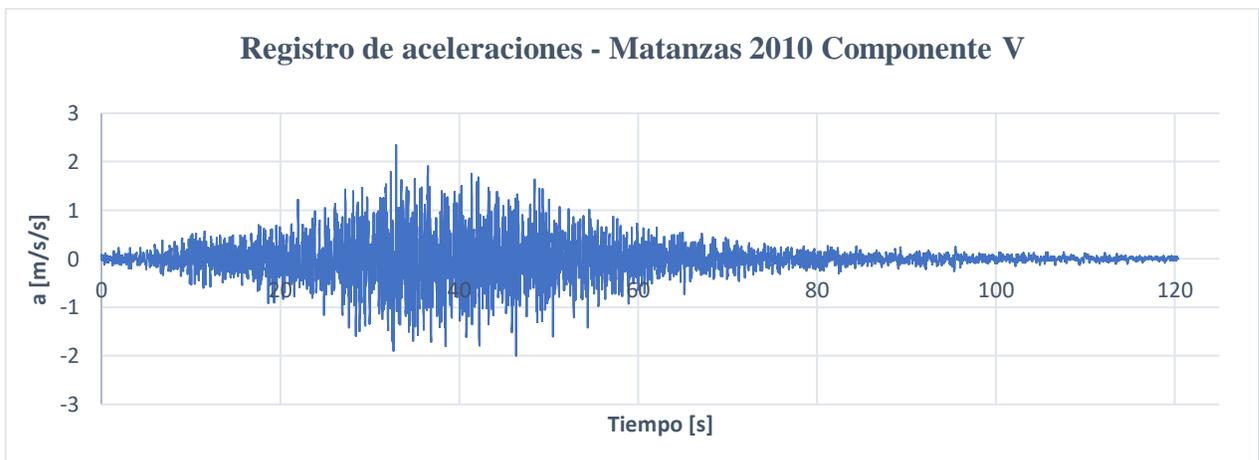


Figura 5.8: Registro de aceleraciones – Matanzas 2010, Componente V.

La Figura 5.9, Figura 5.10 y Figura 5.11 muestran los registros de aceleraciones del evento Lolloe 1985 en sus tres componentes.

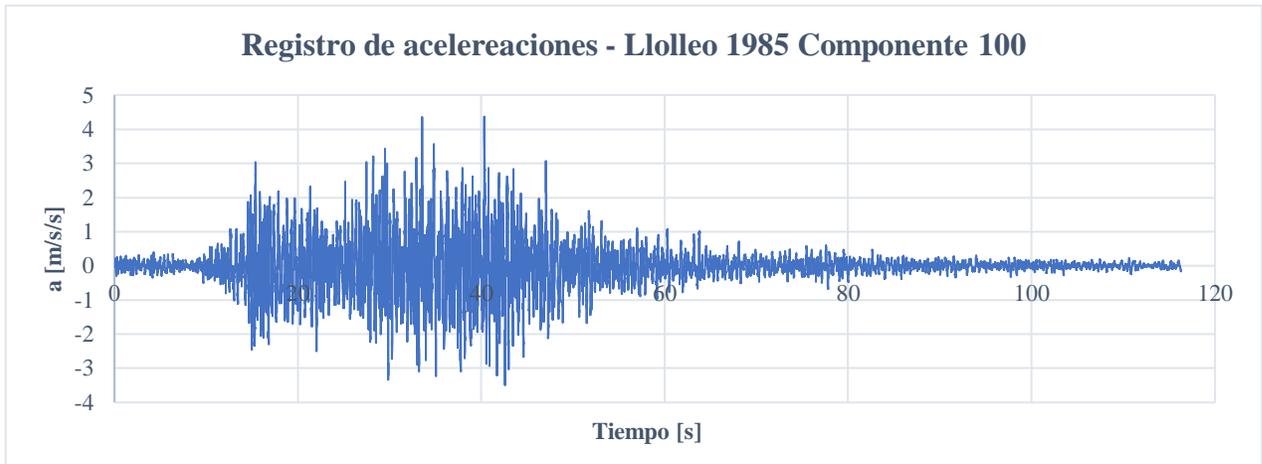


Figura 5.9: Registro de aceleraciones – Lolloe 1985, Componente 100.

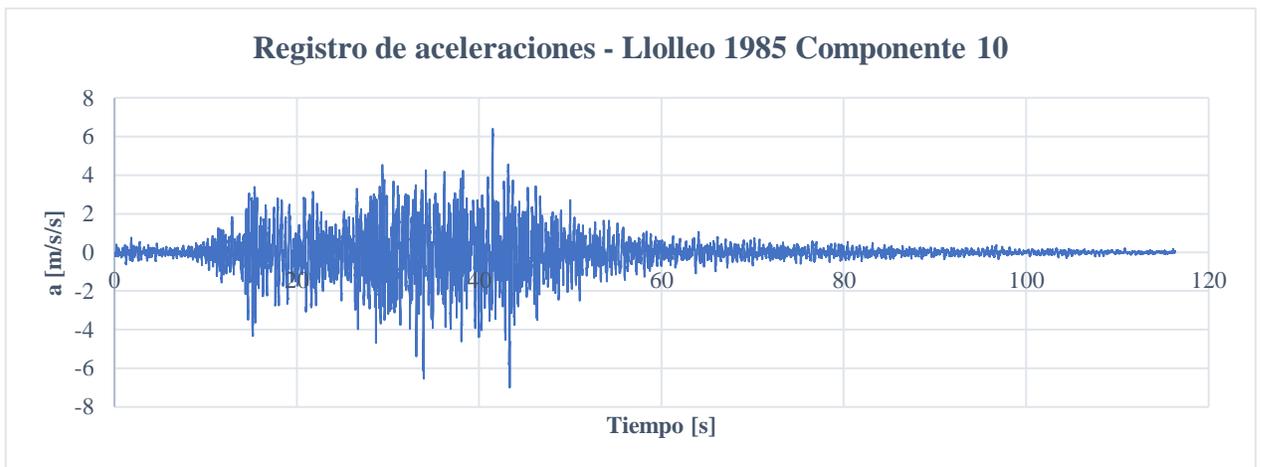


Figura 5.10: Registro de aceleraciones – Lolloe 1985, Componente 10.

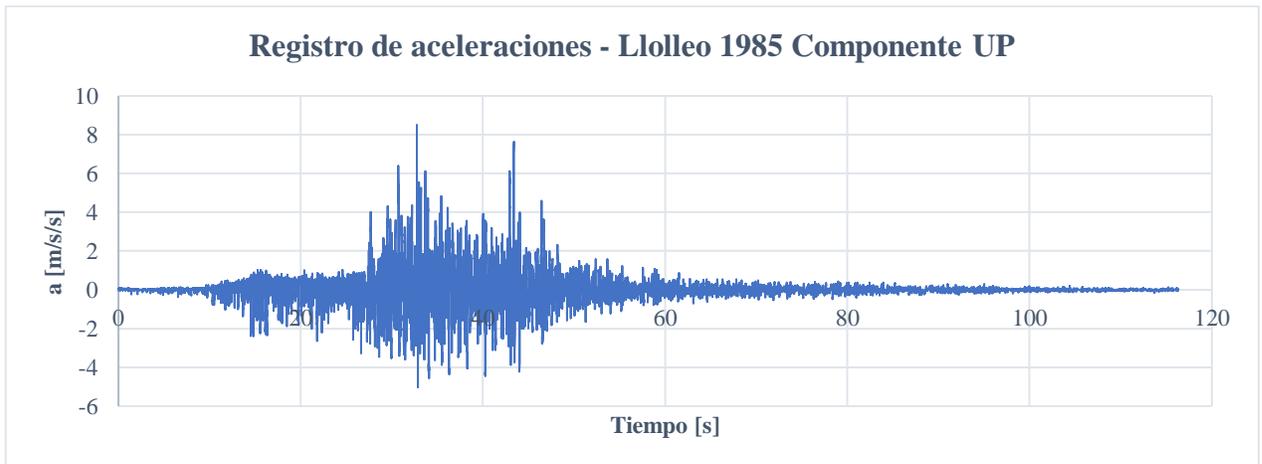


Figura 5.11: Registro de aceleraciones – Lolloe 1985, Componente UP.

- **Amplificación de registros de aceleración**

La norma sísmica establece que para cada par de registros horizontales se deben construir los espectros de pseudo – aceleración para $\xi = 0.05$ y se deben combinar según la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS). Los registros se deben modificar de manera que el promedio de los espectros de respuesta combinados con SRSS para los tres pares de registros, no resulte menor que 1.17 veces el espectro de referencia.

En la Figura 5.12 se presentan las combinaciones SRSS de los espectros de pseudo – aceleración calculados a partir de los registros horizontales (sin amplificar) de cada evento, en comparación con el espectro de referencia. El detalle de cada espectro se puede ver en Anexo A.

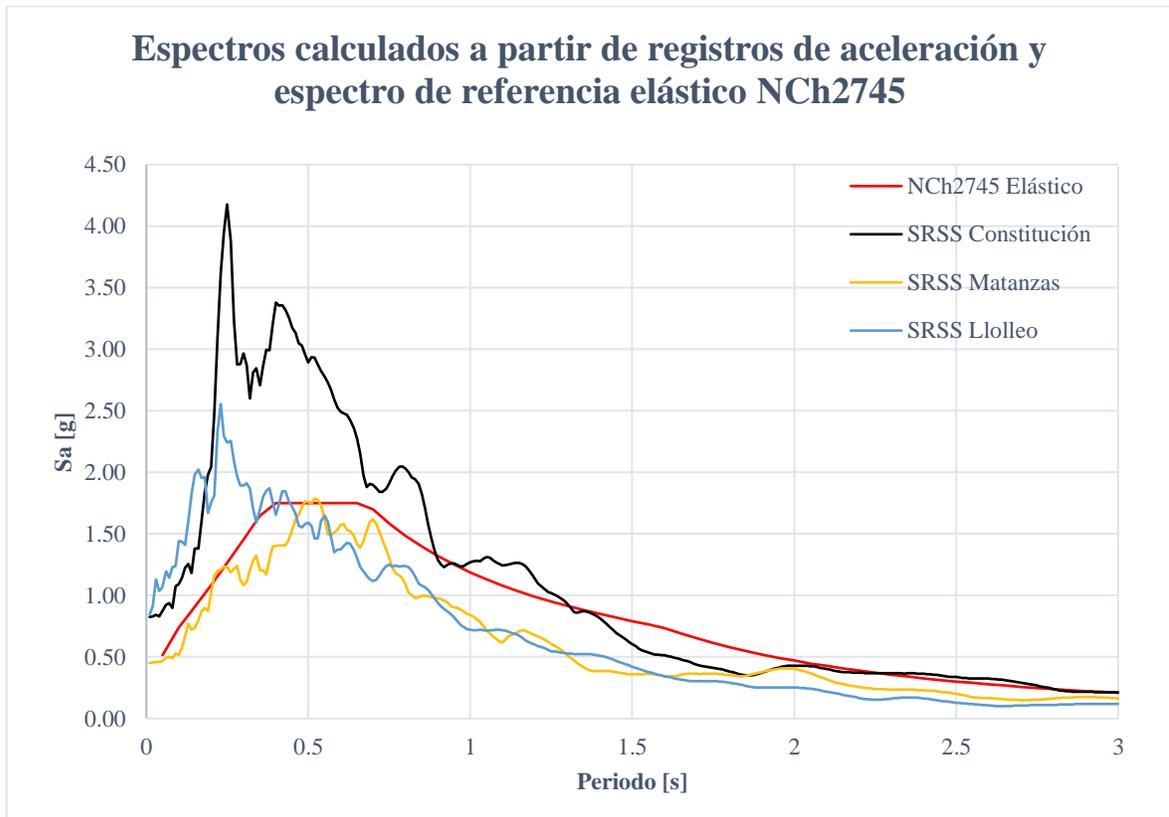


Figura 5.12: Combinación SRSS de espectros calculados a partir de registros de aceleración y espectro de referencia definido por el espectro elástico de NCh2745.

Se observa que las combinaciones SRSS de los espectros de cada evento no cumplen el requisito de uniformidad anteriormente mencionado. Por lo tanto, los registros de aceleración deben ser amplificados por un factor que permita cumplir el requisito. A continuación, se presentan los factores utilizados en cada evento sísmico.

Tabla 5.5: Factores de amplificación de los registros sísmicos.

Evento sísmico	Factor de amplificación
Constitución 2010	1.1
Matanzas 2010	2.2
Llolleo 1985	1.7

La Figura 5.13 muestra las combinaciones SRSS de los espectros calculados a partir de los registros horizontales amplificados para cada evento. Debido al uso de los factores de amplificación de los registros de aceleración, se observa que se cumple el requisito de uniformidad sísmica.

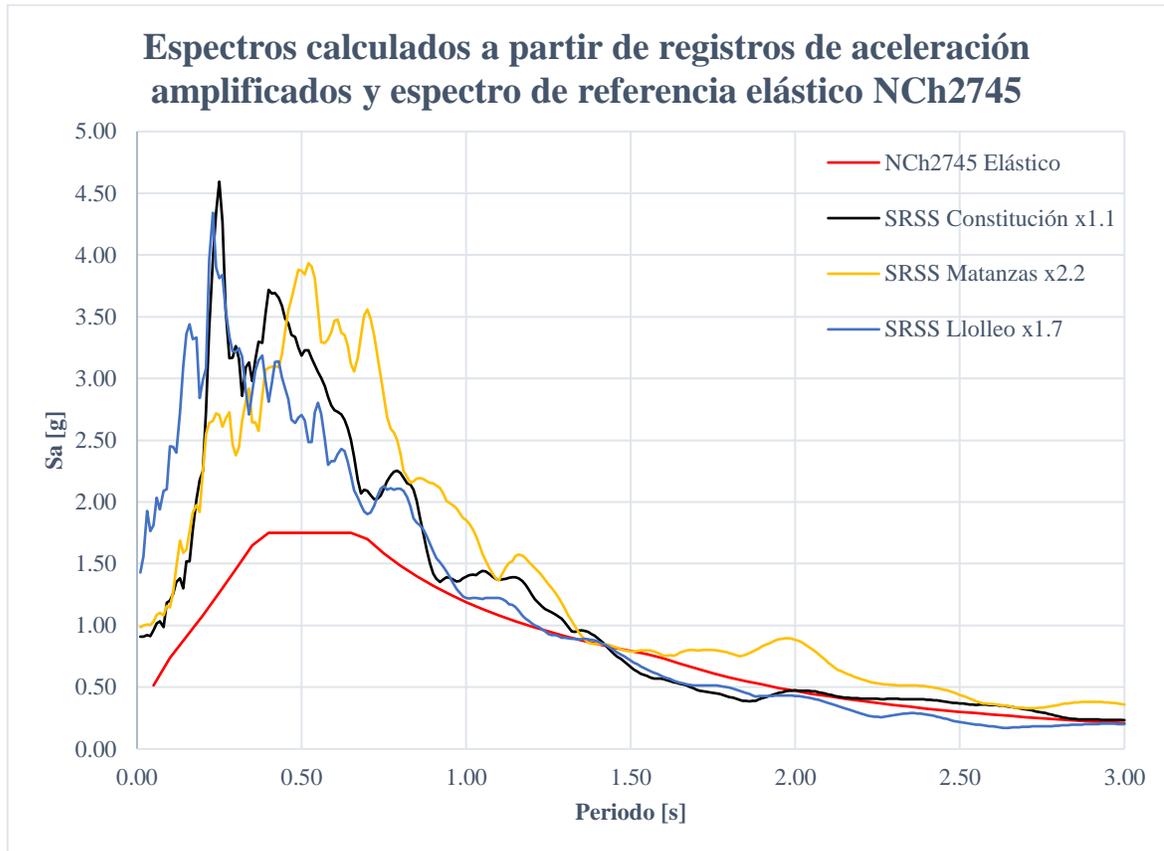


Figura 5.13: Combinación SRSS de espectros calculados a partir de registros de aceleración amplificados y espectro de referencia definido por el espectro elástico de NCh2745.

5.1.5. Combinaciones de cargas

5.1.5.1. Simbología de cargas

La simbología usada para entender las combinaciones de cargas se presenta en Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Simbología de las cargas.

Cargas	Símbolo
Muertas o permanentes	D
Vivas o sobrecargas	L
Sísmica horizontal – Eje X	S_x
Sísmica horizontal – Eje Y	S_y
Sísmica – Eje Vertical	S_z

5.1.5.2. Demanda sísmica

- Combinación de efectos de componentes horizontales del sismo

Para combinar los efectos de las componentes horizontales del sismo se deben considerar las irregularidades torsionales presentes en el muelle transparente, causadas por el traslado longitudinal de las grúas STS cuando son operadas. Por consiguiente, y cumpliendo lo establecido por la disposición 5.1.2 de la norma NCh2369 actualizada, se debe considerar el 100% de la sollicitación sísmica en una dirección y el 30% de la sollicitación sísmica actuando en la dirección ortogonal a la anterior.

- Demanda sísmica vertical

Una buena práctica nacional en el diseño sísmico de muelles transparentes es utilizar el 100% de la sollicitación sísmica en el eje vertical, siendo esta definida por el espectro de diseño vertical presentado en la sección 5.1.4.1.

- Combinaciones de demandas sísmicas

A partir de lo previamente mencionado, se consideran las siguientes combinaciones de demandas sísmicas en función de su dirección:

$$E_{x1} = \pm S_x \pm 0.3 \cdot S_y \pm S_z$$

Donde E_{x1} = Demanda sísmica horizontal 1 combinada para eje X.

$$E_{y1} = \pm 0.3 \cdot S_x \pm S_y \pm S_z$$

Donde E_{y1} = Demanda sísmica horizontal 1 combinada para eje Y.

Adicionalmente, la disposición 4.5 de la norma NCh2369 actualizada establece las siguientes combinaciones de demandas sísmicas:

$$E_{x2} = \pm S_x \pm 0.3 \cdot S_y \pm 0.3 \cdot S_z$$

Donde E_{x2} = Demanda sísmica horizontal 2 combinada para eje X.

$$E_{y2} = \pm 0.3 \cdot S_x \pm S_y \pm 0.3 \cdot S_z$$

Donde E_{y2} = Demanda sísmica horizontal 2 combinada para eje Y.

$$E_{x3} = \pm 0.3 \cdot (S_x \pm 0.3 \cdot S_y) \pm S_z$$

Donde E_{x3} = Demanda sísmica horizontal 3 combinada para eje X.

$$E_{y3} = \pm 0.3 \cdot (0.3 \cdot S_x \pm S_y) \pm S_z$$

Donde S_{y3} = Demanda sísmica horizontal 3 combinada para eje Y.

5.1.5.3. Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga consideradas están estipuladas en la norma de “Diseño estructural – Disposiciones generales y combinaciones de carga” – NCh3171. Dicha norma establece las combinaciones de carga para los métodos de diseño LRFD y ASD, en el presente estudio se considera el método ASD.

A continuación, se muestran las combinaciones de carga utilizadas en el análisis sísmico de las estructuras estudiadas.

Tabla 5.7: Combinaciones de carga

Norma	N° Combinación	Factores de carga			
		D	L	$E_{xi} (i=1,2,3)$	$E_{yi} (i=1,2,3)$
NCh3171	2	1	1	0	0
	5 b)	1	0	1	0
		1	0	0	1
	6 b)	1	0.75	0.75	0
		1	0.75	0	0.75
	-	9	1	1	1
1			1	0	1

Las combinaciones 1, 3, 4 y 7 definidas en la norma NCh3171 no se consideran en el análisis debido a que no incluyen la demanda sísmica o generan solicitaciones menores. Según expertos, actualmente la combinación 8 definida en la norma NCh3171 no se utiliza, por lo tanto se opta por excluirla del análisis sísmico.

5.2. Modelo del muelle

A continuación, se presentan las dimensiones y la materialidad de las vigas, pilotes, losas, entre otros, considerados en la modelación del muelle transparente. Estos elementos estructurales son definidos a partir de planos y bases de diseño de diversos proyectos portuarios, los cuales fueron proporcionados por la empresa PMI Energy Services.

5.2.1. Materiales

Los materiales considerados en la modelación del muelle se presentan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Materiales de los elementos estructurales.

Hormigón					
Elemento	Hormigón	f'c [MPa]	Ec [Mpa]	Densidad [ton/m³]	Coef. Poisson, v
Vigas longitudinales	H40	35	27805	2.5	0.2
Vigas transversales					
Losa					
Acero					
Elemento	Hormigón	f'c [MPa]	Ec [Mpa]	Densidad [ton/m³]	Coef. Poisson, v
Línea de pilotes eje A	A36	250	210000	7.85	0.3
Línea de pilotes eje B					
Línea de pilotes eje C					
Línea de pilotes eje D					
Línea de pilotes eje E	A572Gr50	345	210000	7.85	0.3

5.2.2. Dimensiones de los elementos estructurales

A continuación, se presentan las dimensiones de los elementos estructurales que componen el muelle transparente.

Tabla 5.9: Dimensiones de los elementos estructurales.

Hormigón		
Elemento	Ancho [mm]	Alto [mm]
Vigas longitudinales	700	1600
Vigas longitudinales secundarias	700	1200
Vigas transversales	700	1600
Viga de borde	500	1600
Acero		
Elemento	Diámetro [mm]	Espesor [mm]
Línea de pilotes eje A	1200	25
Línea de pilotes eje B	1000	20
Línea de pilotes eje C	1000	20
Línea de pilotes eje D	1200	20
Línea de pilotes eje E	1200	25

5.2.3. Geometría de la estructura

Se procede a mostrar la geometría de la estructura conformada por vigas longitudinales, vigas transversales, vigas de borde y pilotes. Las siguientes figuras muestran distintas vistas de la geometría, incluyendo las dimensiones correspondientes.

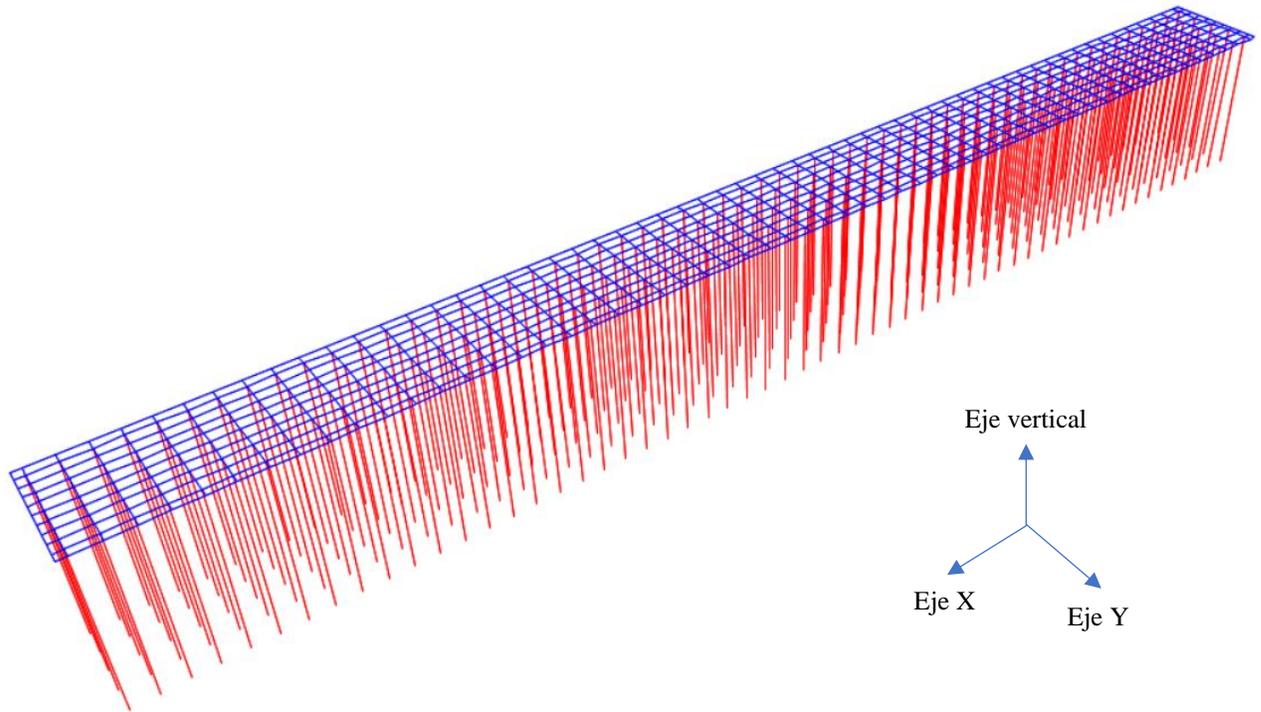


Figura 5.14: Vista tridimensional de la geometría N° 1 y eje de coordenadas.

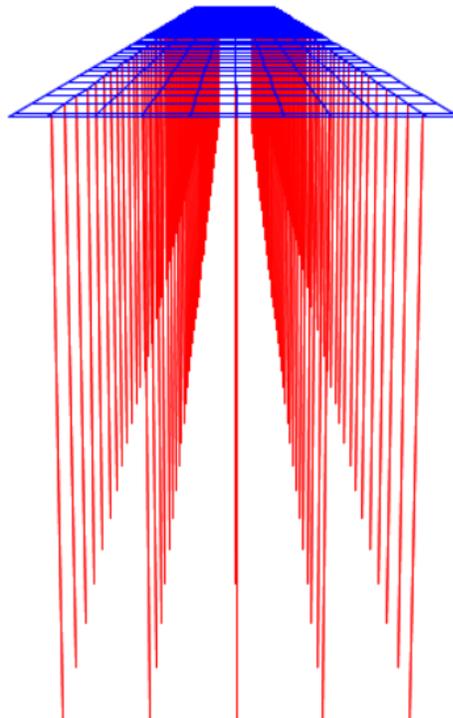


Figura 5.15: Vista tridimensional de la geometría N° 2.

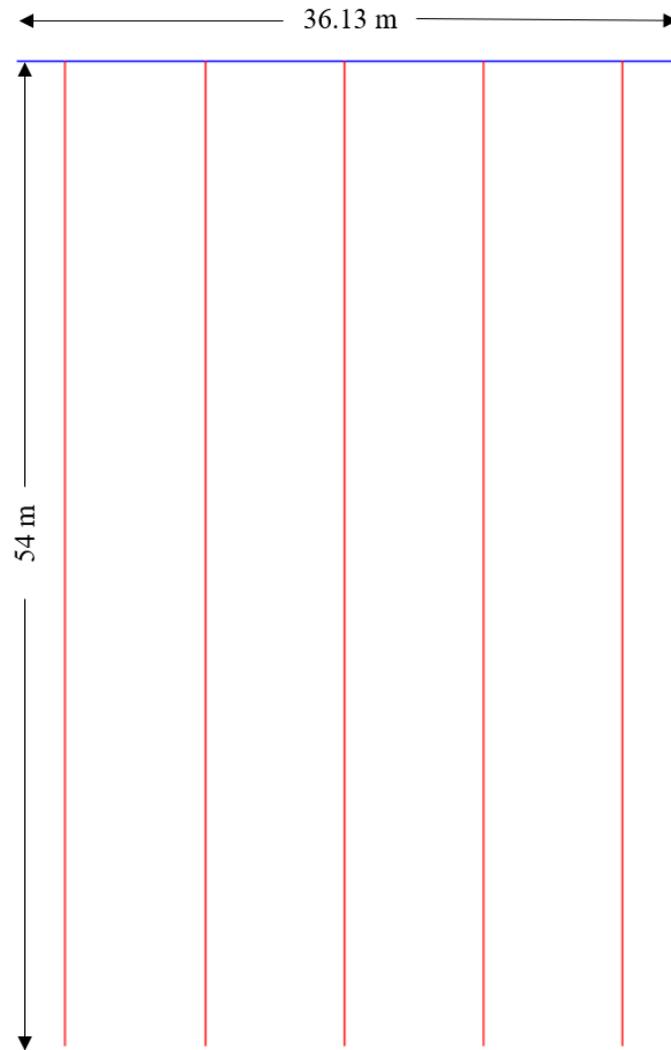


Figura 5.16: Vista en elevación de la geometría N° 1. Plano Y-Vertical.

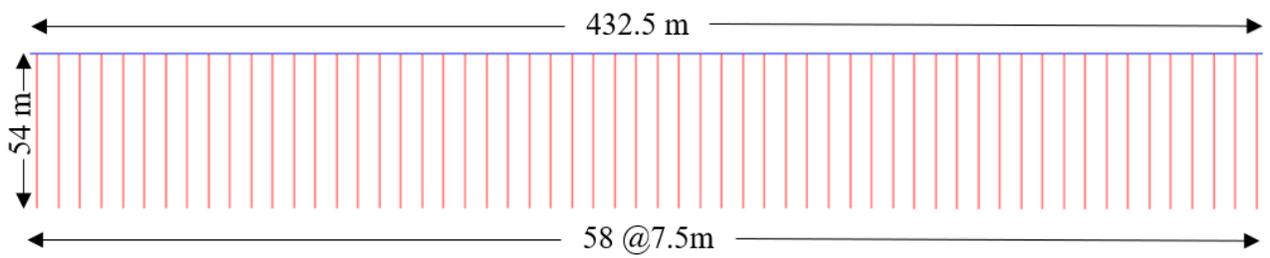


Figura 5.17: Vista en elevación de la geometría N° 2. Plano X-Vertical.

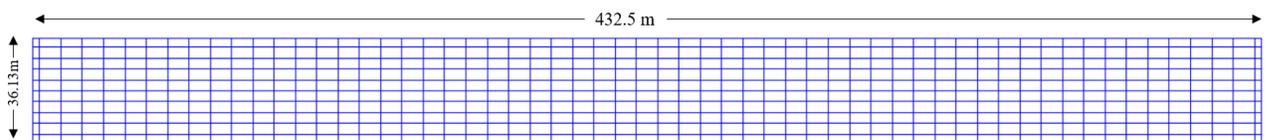


Figura 5.18: Vista en planta de la geometría. Plano X-Y.

5.2.4. Suelo de fundación

El informe de mecánica de suelos detalla la estratigrafía del suelo de fundación de la estructura. A continuación, se presentan los estratos que se consideran en la modelación de la estructura.

Tabla 5.10: Estratigrafía del suelo de fundación.

Horizonte	Estrato
H-1	Enrocado 1”- 4” a 1”-6”.
H-2	Limo de baja plasticidad.
H-3	Depósito de arena fina a media.
H-4	Roca granítica basal.

En el modelo se deben considerar las constantes de balasto horizontales suelo – pilote mediante resortes de rigidez variable con la profundidad. A continuación, se presenta la metodología de cálculo de la constante de balasto sísmicas, las que dependen de la constante de balasto estática.

5.2.4.1. Constantes de balasto sísmicas

$$k_s = 1.5 \cdot k_e$$

Donde k_s = Constante de balasto sísmica.

k_e = Constante de balasto estática.

5.2.4.2. Constantes de balasto estáticas

Tabla 5.11: Constantes de balasto estáticas.

Horizonte	Constante de balasto estática	Comentario
H-1	$k_{e1} = 900 \frac{\sqrt{Z}}{D}$	En $[\text{ton}/\text{m}^3]$ si el diámetro, D , del pilote y la profundidad, Z , medida a partir de la superficie del talud del prisma, se expresan en $[m]$.
H-2	$k_{e2} = \frac{1700}{D}$	En $[\text{ton}/\text{m}^3]$ si D en $[m]$.
H-3	$k_{e3} = 1500 \frac{\sqrt{Z}}{D}$	En $[\text{ton}/\text{m}^3]$ si el diámetro del pilote, D , y la profundidad, Z , bajo la superficie del talud del prisma, se expresan en $[m]$.
H-4	$k_{e4} = \frac{46.000}{D}$	En $[\text{ton}/\text{m}^3]$ si D en $[m]$. La penetración posible en roca se estima en 3 m.

5.2.5. Modelación de la estructura

Luego de crear la geometría del modelo, se procede a asignar los materiales y secciones de todos los elementos estructurales, cuando corresponde se aplican las cargas definidas en la sección 5.1.

Adicionalmente, en las dos direcciones horizontales (X e Y), se asignaron los resortes con rigideces calculadas a partir de las constantes de balasto previamente presentadas. Los pilotes se apoyaron sobre la base mediante apoyos deslizantes.

Las siguientes figuras muestran el modelo obtenido:

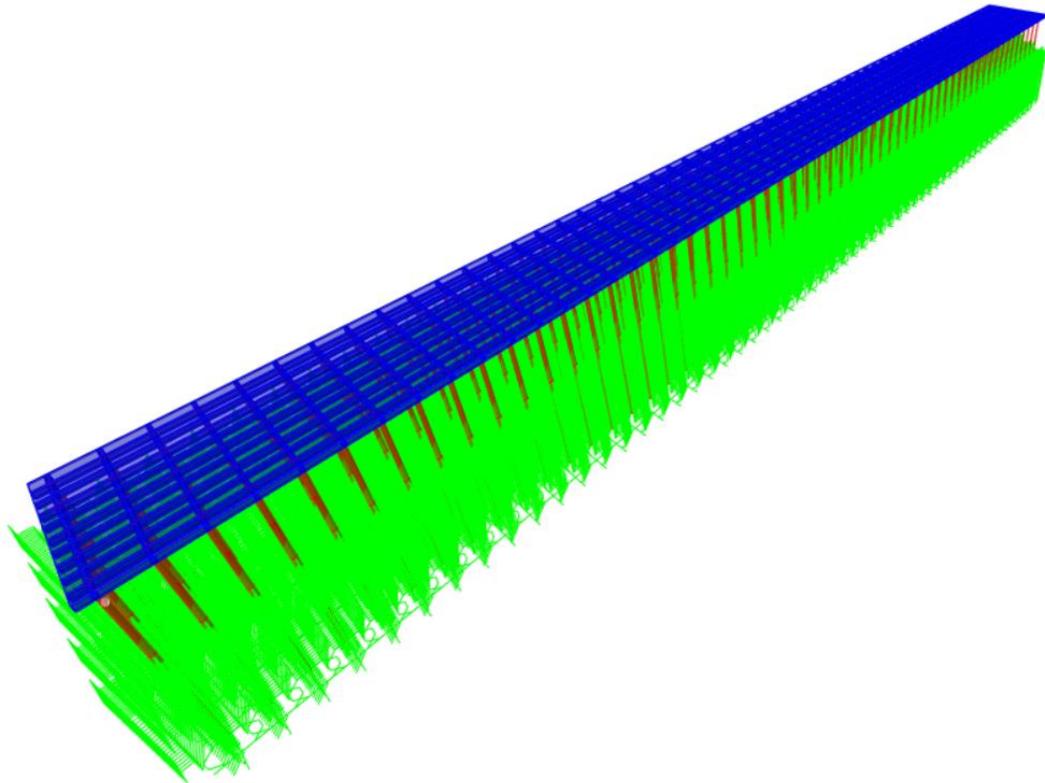


Figura 5.19: Vista tridimensional del modelo N° 1.

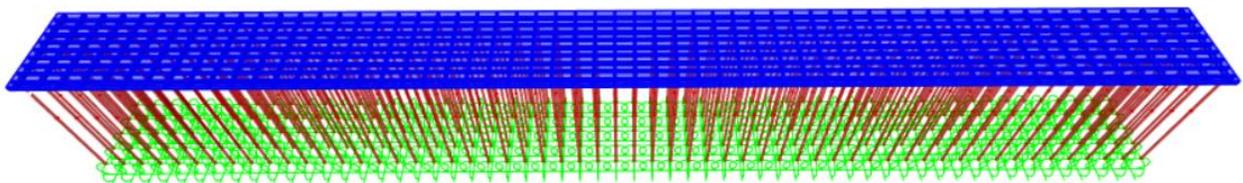


Figura 5.20: Vista tridimensional del modelo N° 2.

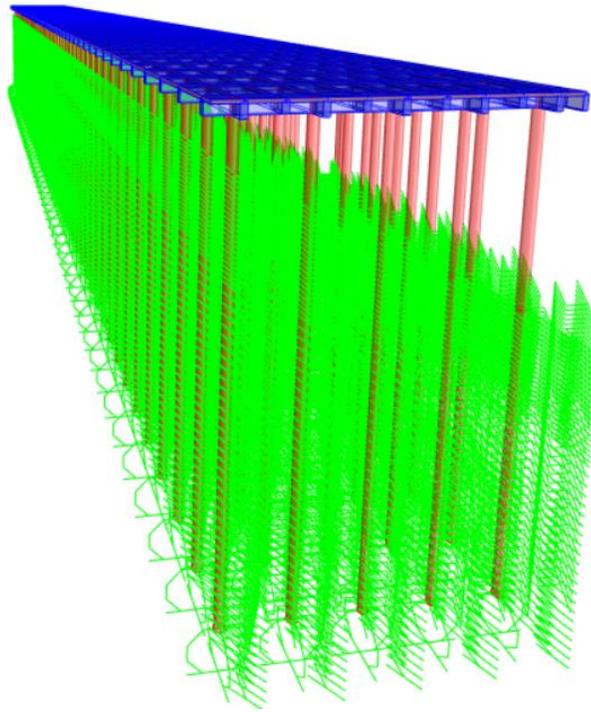


Figura 5.21: Vista tridimensional del modelo N° 3.

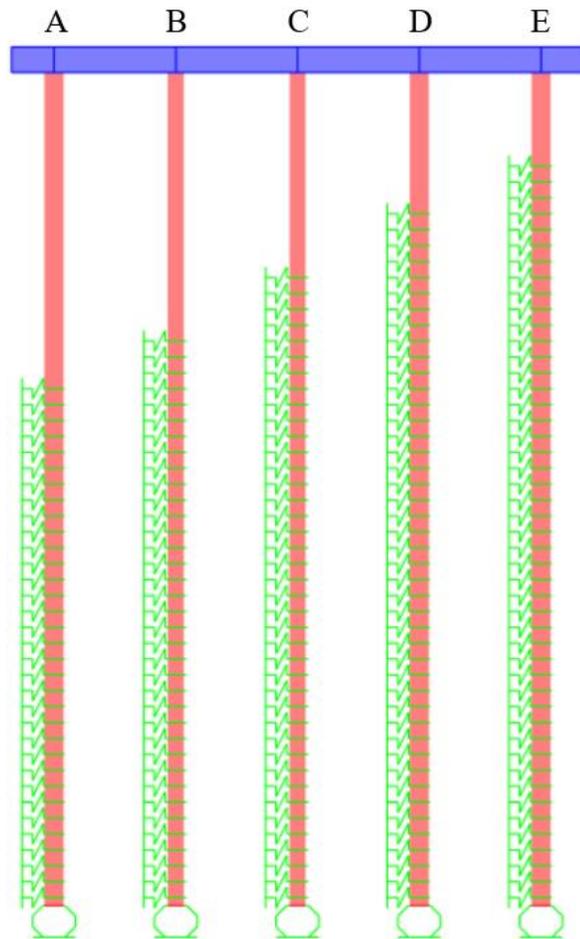


Figura 5.22: Vista en elevación del modelo N° 1. Plano Y-Vertical.

5.3. Modelo de grúa STS

El modelo de la grúa de contenedores proporcionado por la empresa PMI Energy Services corresponde a uno utilizado en los análisis sísmicos del Puerto San Vicente Terminal Internacional, ubicado en la costa de la Provincia de Concepción. Con el propósito de desarrollar el análisis de manera adecuada, algunas dimensiones del modelo original fueron modificadas.

5.3.1. Geometría

A continuación, se muestra la geometría y principales dimensiones de la estructura.

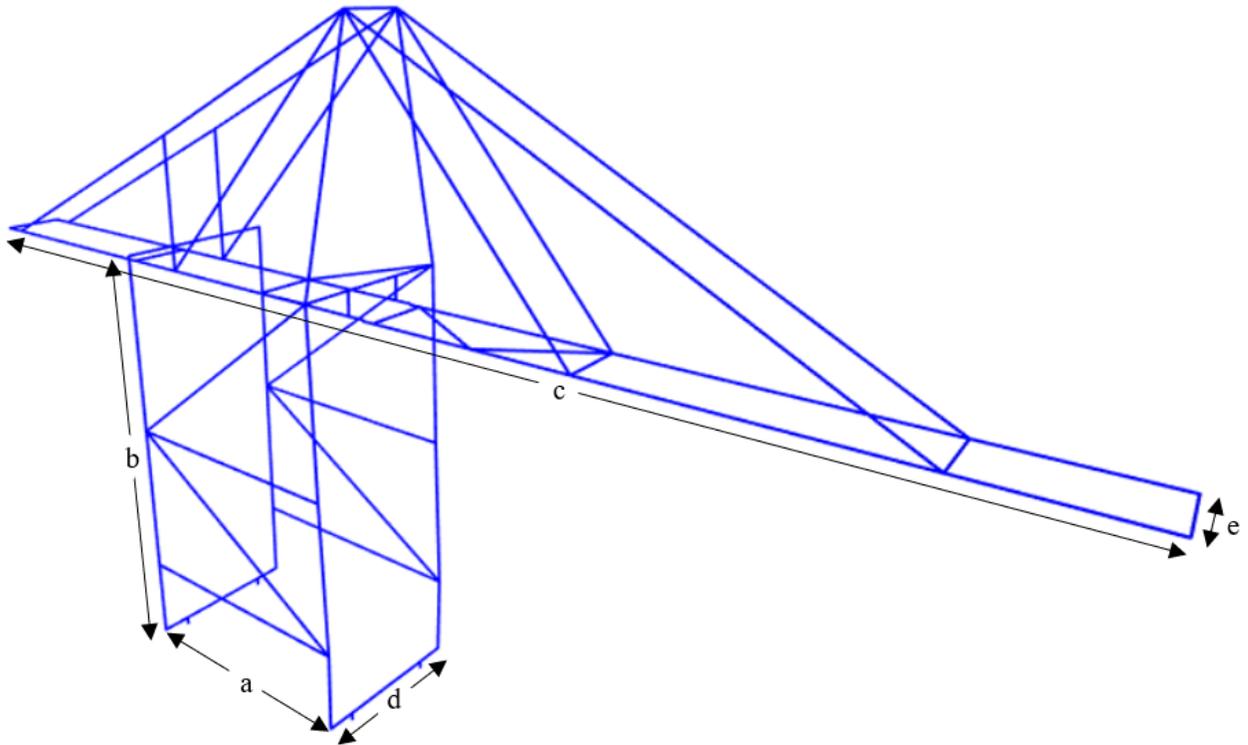


Figura 5.23: Vista tridimensional y dimensiones de la geometría de la grúa.

Tabla 5.12: Dimensiones de la grúa STS.

Elemento	Largo [m]
a	30.48
b	51.5
c	136.3
d	20.4
e	7.7

5.3.2. Cargas consideradas en el modelo

- Peso de la estructura

El peso de la estructura está definido mediante cargas puntuales y cargas distribuidas en los elementos que conforman la grúa STS (elementos frames). En el modelo no se considera el peso propio de las secciones con las que fue definida la estructura.

El peso muerto (DL) de la grúa STS es de 1500 [ton].

- Trolley, sistema de levante y carga levantada

Las cargas producidas por el trolley, el sistema de levante (spreader) y la carga levantada (los contenedores) se consideran en el modelo mediante cargas puntuales en el sector más desfavorable de la viga principal, esto es en la posición que detalla la Figura 5.24.

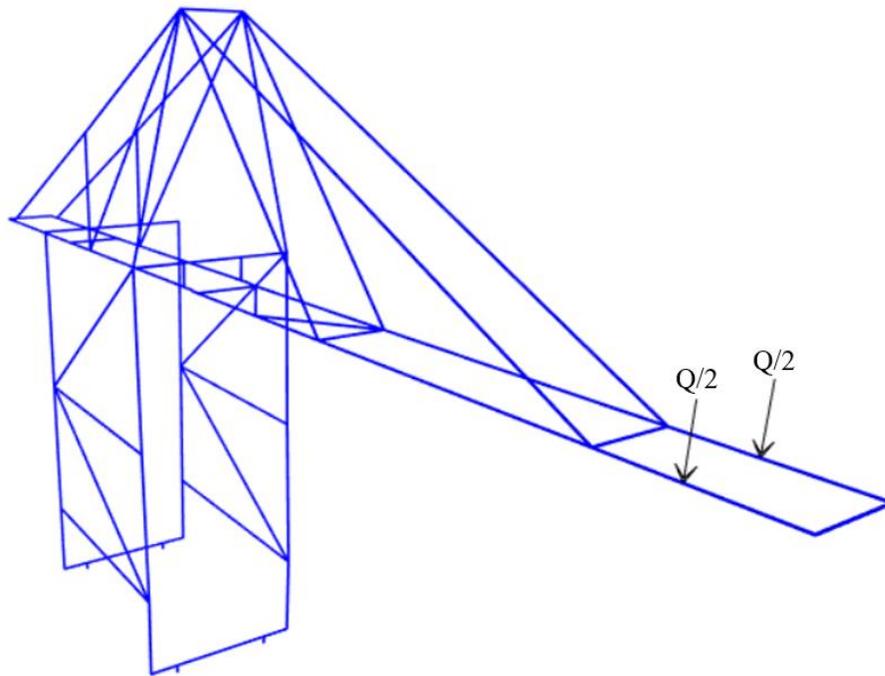


Figura 5.24: Puntos de aplicación de las cargas $Q/2$ en la grúa STS.

La Tabla 5.13 precisa las magnitudes de las cargas descritas previamente.

Tabla 5.13: Cargas consideradas en el modelo de la grúa STS.

Tipo	Simbología	Q [ton]
Carga del trolley	TL	28
Carga del sistema de levante	LS	20
Carga levantada	LL	65

Por último, se define la masa sísmica de la grúa STS:

$$\text{Masa sísmica}_{grúa} = DL + TL$$

5.4. Modelo integrado muelle – grúa

El modelo debe considerar las 4 grúas STS sobre el tablero de hormigón. Para considerar las variaciones de ubicación de las grúas STS sobre el tablero, se analizan diferentes posiciones de estas en el eje longitudinal (Ver Tabla 5.3 de sección 5.1.3). En la Figura 5.25 se muestra el modelo integrado, específicamente para la posición N° 3 de las grúas STS.

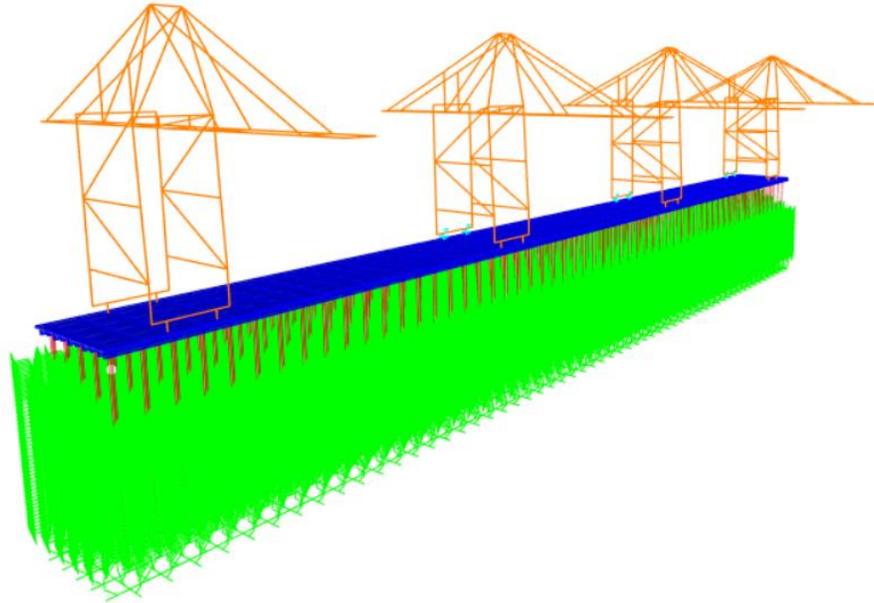


Figura 5.25: Vista tridimensional del modelo integrado.

Por otra parte, en el eje transversal las grúas se sitúan alineando los bogies lado mar con la línea de pilotes del eje A y los bogies lado tierra con la línea de pilotes del eje E (Figura 5.26).

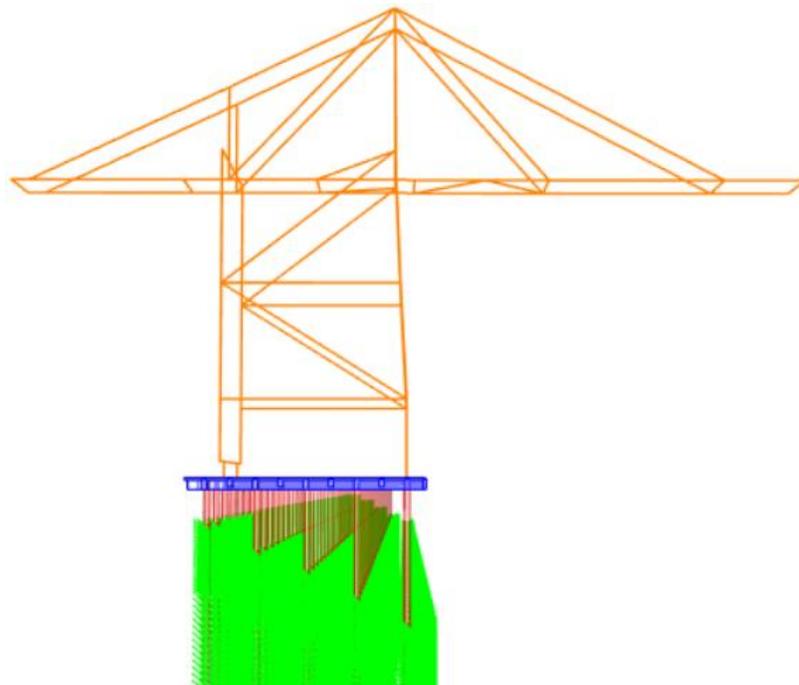


Figura 5.26: Vista tridimensional de la alineación de los bogies con los pilotes de los ejes A y E.

5.5. Análisis sísmicos de las estructuras

5.5.1. Masa sísmica

La masa sísmica definida para los análisis sísmicos es:

$$\text{Masa sísmica} = PP + 0.25 \cdot SC + 4 \cdot \text{Masa sísmica}_{\text{grúa}}$$

Donde *PP*: *Peso propio de la estructura muelle.*

SC: *Sobrecarga de uso.*

5.5.2. Análisis Modal – Espectral

Los análisis modal – espectral se ejecutan considerando las cargas estipuladas en las secciones: 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 y 5.1.4.1. Por otra parte, las combinaciones de carga son las definidas en la sección 5.1.5.

El propósito de realizar análisis de tipo elástico dinámico o modal – espectral es determinar de forma preliminar si se producen fuerzas de tracción en los apoyos de las grúas STS sobre el tablero, con el espectro de fuerzas elástico. De esta forma inicial se evalúa el requerimiento de anclajes para las grúas STS en términos de evitar el total descarrilamiento que puede conducir a un total colapso de las grúas.

Para conseguir lo previamente mencionado, la conexión entre los cuatro puntos de apoyo de las grúas STS y el tablero del muelle se modela mediante un elemento de alta rigidez que reemplaza al bogie y se conecta con rótula al riel del tablero. (Figura 5.27). El uso del elemento rígido (anclajes) como conexión, permite determinar la tracción y corte para diseñar el elemento que restrinja el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS.

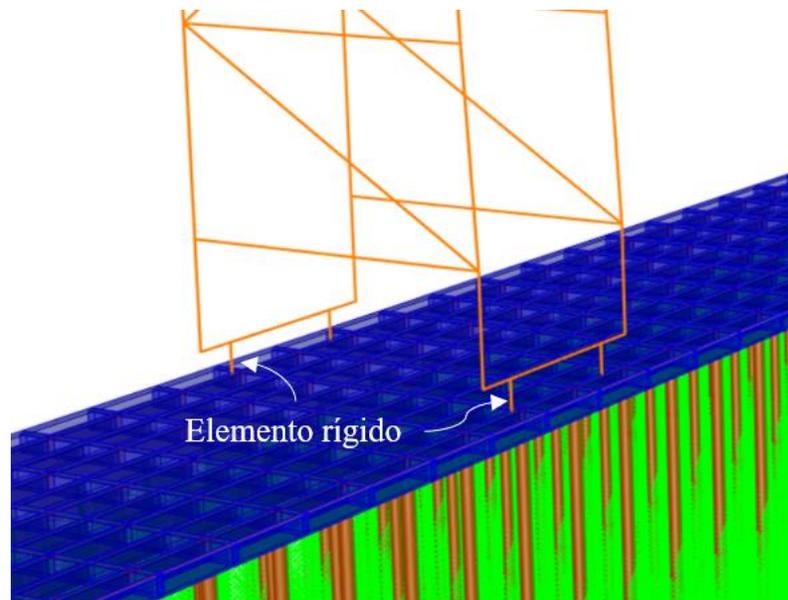


Figura 5.27: Vista tridimensional de la conexión grúa - tablero. Caso modal – espectral.

Al realizar la modelación se tienen en consideración los planos de una grúa STS – tipo (Anexo B), específicamente en el sector de los bogies. El punto inferior del elemento rígido se conecta con el tablero mediante un apoyo rotulado, tal como lo estipula la disposición 15.6.1 de la norma NCh2369 actualizada. Por su parte, el punto superior del elemento rígido está conectado con la

grúa liberando el momento en torno al eje Y, ya que según los planos, el bogie dispone de una rótula que permite el giro en torno a ese eje.

5.5.3. Análisis Tiempo – Historia

Los análisis tiempo – historia no lineal se ejecutan considerando las cargas estipuladas en las secciones: 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 y 5.1.4.2.

El propósito de realizar análisis de tipo tiempo – historia son dos: en primer lugar, describir el movimiento del punto superior de la conexión entre la grúa STS y el tablero. En segundo lugar, determinar las fuerzas máximas que se producen en la conexión grúa – tablero para condiciones específicas de apoyo que se presentan a continuación.

5.5.3.1. Caso 1: Movimiento de la grúa STS

Para describir el movimiento del punto superior de la conexión entre el tablero y la grúa STS se utiliza un link de tipo aislador, que permite el desplazamiento transversal, longitudinal y vertical del punto superior del link – conexión. Este elemento en particular tiene la capacidad de tomar cargas de compresión, pero no de tracción.

La conexión entre la grúa STS y el tablero del muelle se realiza con el elemento link en los cuatro apoyos de la grúa. De esta manera se puede detallar el movimiento de la grúa en términos de levantamientos y desplazamientos en los ejes horizontales de sus apoyos. La Figura 5.28 resume los desplazamientos que admite la conexión y muestra los cuatro apoyos de la grúa conectados al tablero del muelle mediante el elemento link.

Este análisis sólo tiene como objetivo describir el comportamiento de los puntos superiores de link – conexión. Los puntos inferiores del link no se pueden desplazar, por lo que la grúa STS en este modelo no se descarrila. Por lo tanto, a partir de los casos presentados anteriormente en la sección 3.1.2 en que ocurrieron descarrilamientos parciales o totales de grúas STS, este modelo no es representativo de lo que ocurre en la realidad y no cumple la norma NCh2369 actualizada que indica en su disposición 5.2.3 que “los modelos no lineales deben modelar adecuadamente el comportamiento de los elementos estructurales”.

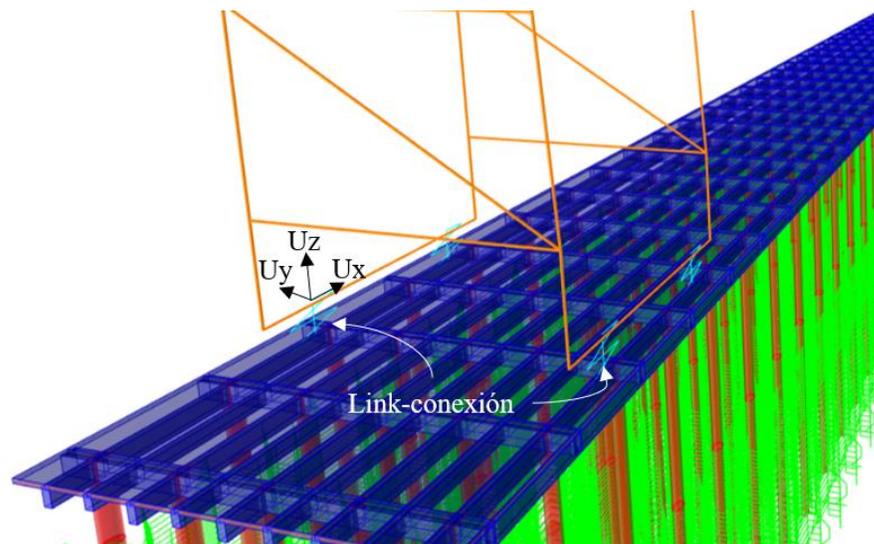


Figura 5.28: Vista tridimensional de link – conexión de la grúa STS y el tablero. Caso tiempo – historia N° 1.

5.5.3.2. Caso 2: Fuerzas en conexión grúa STS – tablero

Para determinar fuerzas que permitan diseñar el elemento que restringe el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS, la conexión entre los apoyos de la grúa y el tablero se debe modelar con un elemento de alta rigidez que reemplaza al bogie y se conecta con rótula al riel del tablero.

En este trabajo se propone restringir el levantamiento de los apoyos lado mar y permitir el libre desplazamiento de los apoyos lado tierra. Por lo tanto, la conexión entre los dos apoyos lado mar de la grúa STS y el tablero del muelle se realiza mediante el elemento rígido (anclajes) rotulado al riel del tablero, mientras que la conexión entre los dos apoyos lado tierra de la grúa STS y el tablero del muelle se realiza mediante el elemento link de tipo aislador.

En la Figura 5.29 se muestra la modelación de la conexión de los cuatro apoyos de la grúa STS y el tablero del muelle para el análisis de determinación de fuerzas máximas producidas en la conexión tablero – grúa STS.

Este modelo, al utilizar los apoyos lado mar como elementos rígidos (anclajes), cumple la norma NCh2369, que específicamente en su Capítulo 13 indica que “se deben utilizar modelos integrados que permitan evaluar el desempeño de topes sísmicos, anclajes u otro elemento cuyo fin sea entregar estabilidad ante eventos sísmicos”, se incorporan anclajes en el lado mar para evitar el total descarrilamiento de la grúa STS.

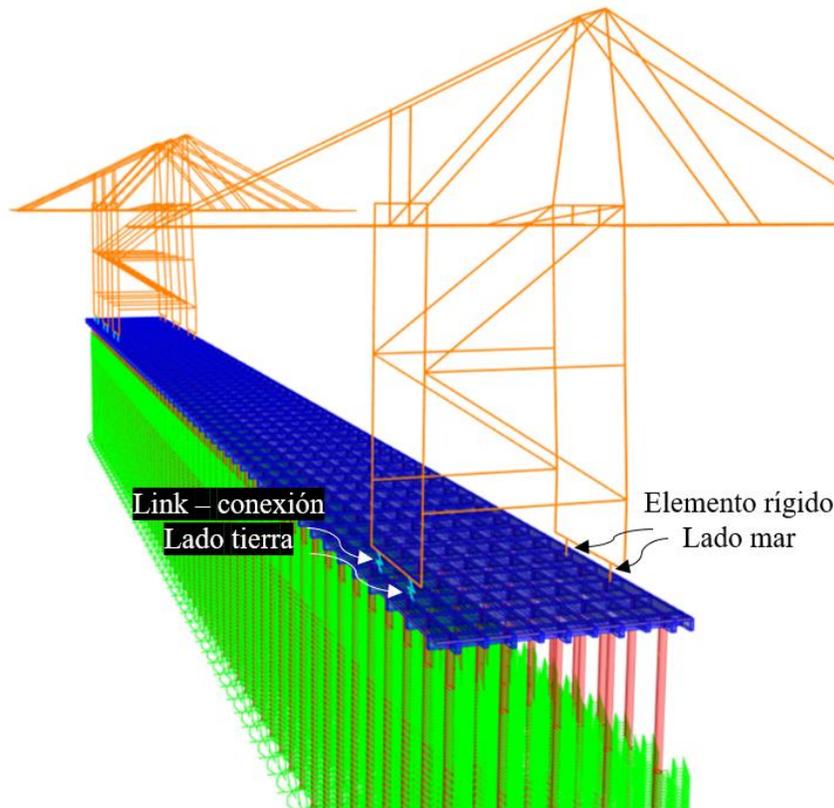


Figura 5.29: Vista tridimensional de la conexión entre la grúa STS y el tablero. Caso tiempo – historia N° 2.

Adicionalmente, se realiza el análisis considerando dos posiciones del trolley, sistema de levante (spreader) y carga levantada. Estas cargas se consideran de la misma manera que en los análisis anteriores, es decir, aplicadas como cargas puntuales con la misma magnitud indicada en la sección 5.3.2.

En la Figura 5.30 y Figura 5.31 se presentan las posiciones en las que se aplican las cargas puntuales mencionadas anteriormente.

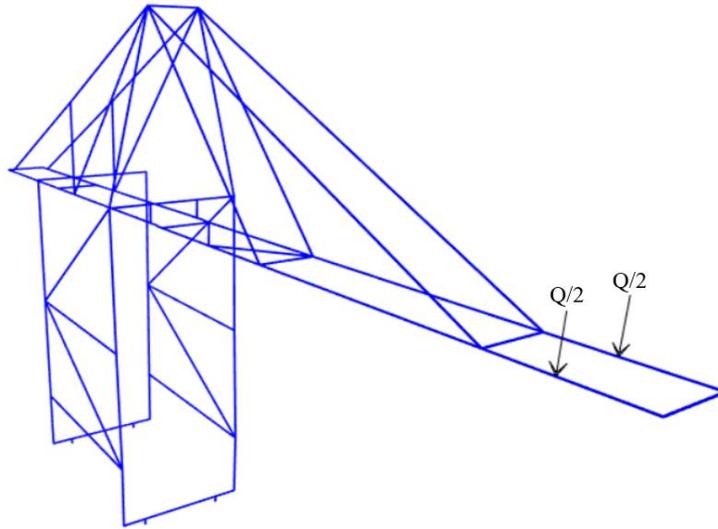


Figura 5.30: Puntos de aplicación 1 de las cargas $Q/2$ en la grúa STS (Posición P1).

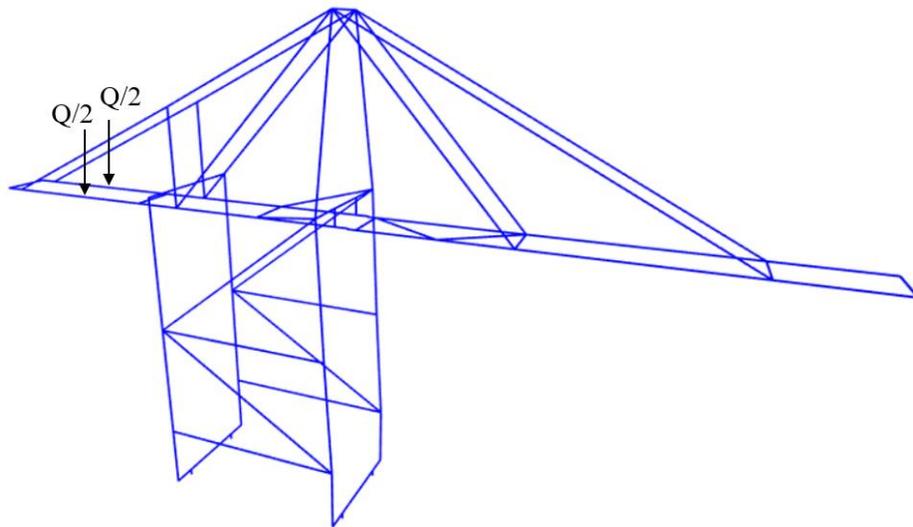


Figura 5.31: Puntos de aplicación 2 de las cargas $Q/2$ en la grúa STS (Posición P2).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN

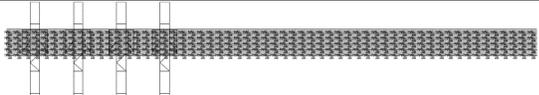
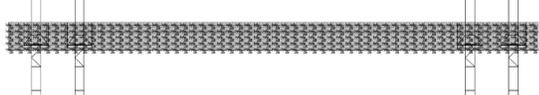
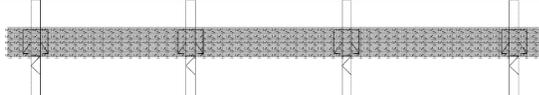
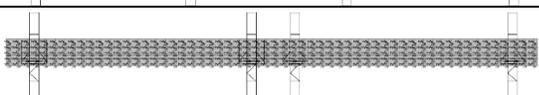
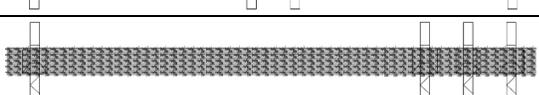
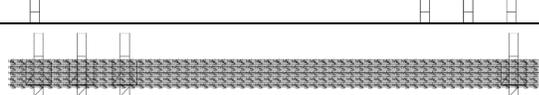
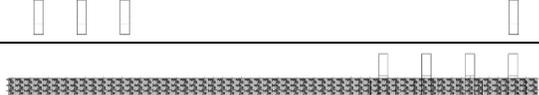
El presente Capítulo tiene como finalidad mostrar los resultados obtenidos de los análisis ejecutados en el software SAP2000 versión 20. Adicionalmente, se presenta un análisis de estos resultados en términos de su implicancia en el proceso de diseño del elemento que restringa el levantamiento de las grúas STS.

6.1. Resultados Análisis Modal – Espectral

En primer lugar, se presentan los resultados más relevantes obtenidos de los análisis modal – espectral, estos son: las fuerzas de tracción y corte (en el eje transversal) en el elemento de alta rigidez que reemplaza al bogie y se conecta con rótula al riel del tablero.

Los resultados que se muestran en la Tabla 6.1 corresponden a los máximos obtenidos en función de la posición de las grúas STS sobre el tablero.

Tabla 6.1: Resultados de fuerzas máximas, Análisis modal – espectral.

Posición de grúas STS	$T_{m\acute{a}x}$ [tonf]	$V_{m\acute{a}x}$ [tonf]
	787	316
	904	381
	887	355
	908	343
	866	327
	805	339
	770	316

Por lo tanto, las solicitaciones máximas de tracción y corte en el eje transversal calculadas mediante el método modal – espectral son:

$$T_{m\acute{a}x} = 908 \text{ [tonf]} \wedge V_{m\acute{a}x} = 380.6 \text{ [tonf]}$$

6.2. Resultados Análisis Tiempo – Historia

Los análisis tiempo – historia ejecutados corresponden a los descritos en la sección 5.5.3 para los registros de Constitución 2010, Matanzas 2010 y Llolleo 1985 debidamente escalados.

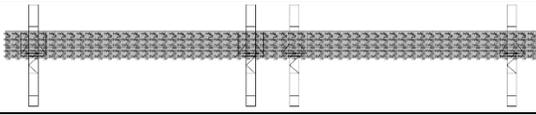
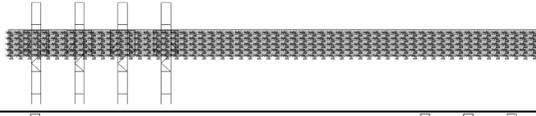
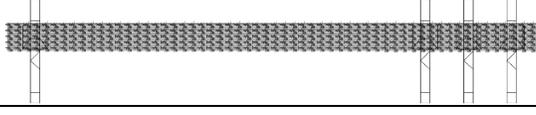
6.2.1. Desplazamientos del punto superior del link – conexión (apoyos sin anclaje)

La primera etapa de ejecución de los análisis tiempo – historia se lleva a cabo según lo establecido en la sección 5.5.3.1.

A continuación, se presentan los resultados que tienen relación con los desplazamientos del punto superior de la conexión entre el tablero y las grúas STS. En particular, los desplazamientos que influyen directamente en el diseño del elemento que restrinja el levantamiento de las grúas STS son: el desplazamiento transversal y vertical del punto superior del link – conexión.

En la Tabla 6.2 se presentan los máximos desplazamientos transversales (eje Y) y verticales (eje Z) obtenidos para cada registro, considerando la ubicación de las grúas STS en las que se produjeron. El detalle de los máximos desplazamientos obtenidos en los tres eventos sísmicos estudiados se encuentra en el Anexo C.

Tabla 6.2: Desplazamientos transversales y verticales máximos para cada registro analizado.

Registro	Ubicación de grúas	UY_{max} [m]	UZ_{max} [m]
Constitución 2010		0.16	0.43
Matanzas 2010		0.12	0.35
Llolleo 1985		0.15	0.28

Adicionalmente, se presenta el detalle de los desplazamientos transversales y longitudinales en el tiempo, obtenidos para la demanda sísmica establecida por el registro de Constitución 2010, esto, debido a que los máximos desplazamientos ocurren para este registro. En particular, estos desplazamientos se obtienen para la configuración de ubicación de grúas STS precisada en la Tabla 6.2, específicamente en la grúa N° 2 (Ver Figura 6.1).

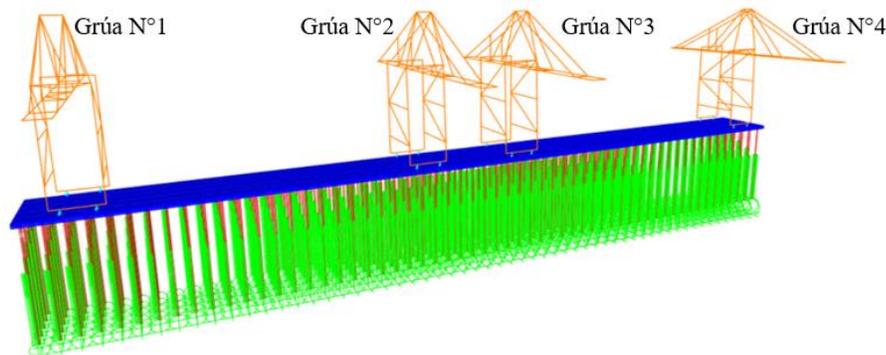


Figura 6.1: Simbología de ubicación de grúas STS, análisis de desplazamientos en apoyos.

La Figura 6.2 y la Figura 6.3 muestran el desarrollo de los desplazamientos transversales y verticales en el tiempo para el punto de conexión en el cual se desarrollan los mayores desplazamientos. Estos ocurren en la grúa N° 2, para la demanda sísmica establecida por los registros de aceleración de Constitución 2010.

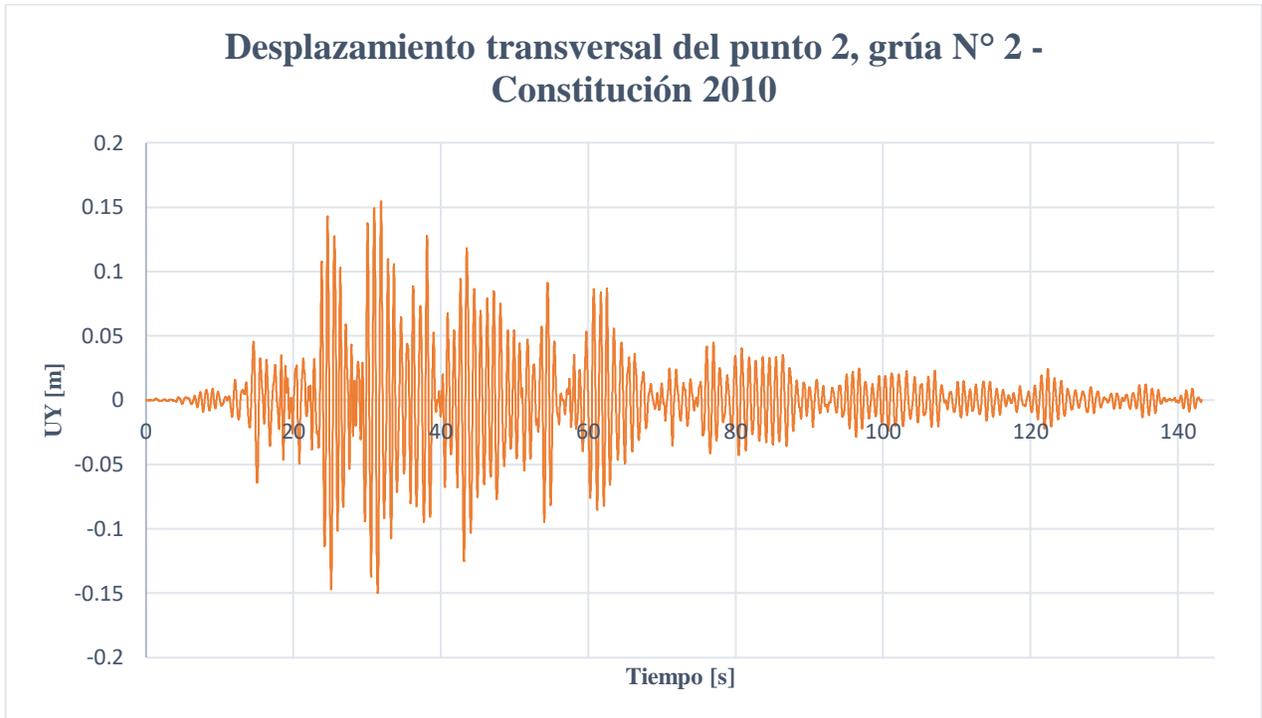


Figura 6.2: Desplazamiento transversal del punto 2, grúa N° 2, registro de Constitución 2010.

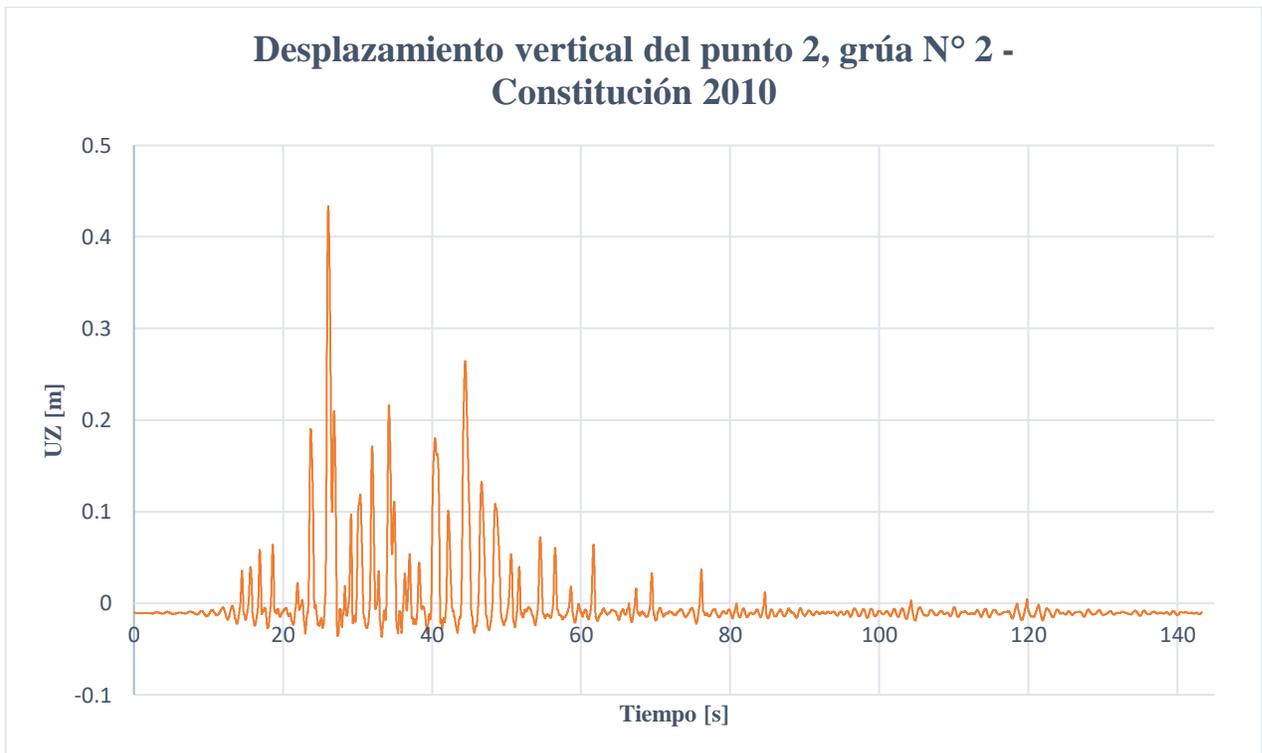


Figura 6.3: Desplazamiento vertical de punto 2, grúa N° 2, registro de Constitución 2010.

6.2.2. Fuerzas en conexión grúa STS – tablero (apoyos lado mar con anclaje)

A continuación, se presentan los resultados que tienen relación con las fuerzas producidas en la conexión entre el tablero y las grúas STS. Como está establecido en la sección 5.5.3.2, la segunda etapa de los análisis tiempo – historia se ejecuta considerando conexiones rígidas (anclajes) en los apoyos lado mar, mientras que las conexiones lado tierra se realizan con elementos tipo link. De esta manera, los apoyos del lado tierra de las grúas STS tienen la capacidad de desplazarse transversal, longitudinal y verticalmente. Además, se consideran dos posiciones del trolley, sistema de levante (spreader) y carga levantada (posición P₁ y posición P₂).

En la Tabla 6.3 se presentan las máximas fuerzas de tracción y corte (en el eje transversal) obtenidos para cada registro, incluyendo la ubicación de las grúas STS en las que se produjeron.

Tabla 6.3. Resultados de fuerzas máximas para cada registro analizado.

Registro	Ubicación de grúas	Posición P ₁		Posición P ₂	
		T _{max} [tonf]	V _{max} [tonf]	T _{max} [tonf]	V _{max} [tonf]
Constitución 2010		1203	738	1282	598
Matanzas 2010		1108	482	1051	502
Llolleo 1985		897	501	979	463

Adicionalmente, la Figura 6.5 y la Figura 6.6 muestra el desarrollo de las fuerzas axiales y corte en el eje transversal en el tiempo para la conexión más solicitada considerando las dos posiciones del trolley, sistema de levante y carga levantada. La conexión más solicitada corresponde a la N° 4 de la grúa N° 2 (Ver Figura 6.4), para la demanda sísmica establecida por el registro de Constitución 2010. El detalle de las máximas fuerzas obtenidas en los tres eventos sísmicos estudiados se encuentra en el Anexo D.

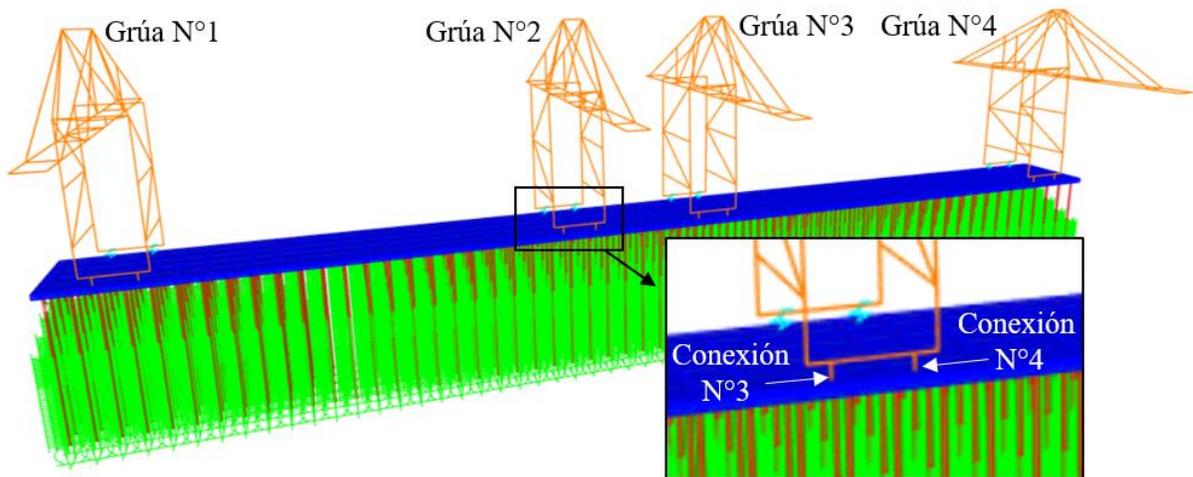


Figura 6.4: Simbología de posición de grúas y conexión más solicitada.

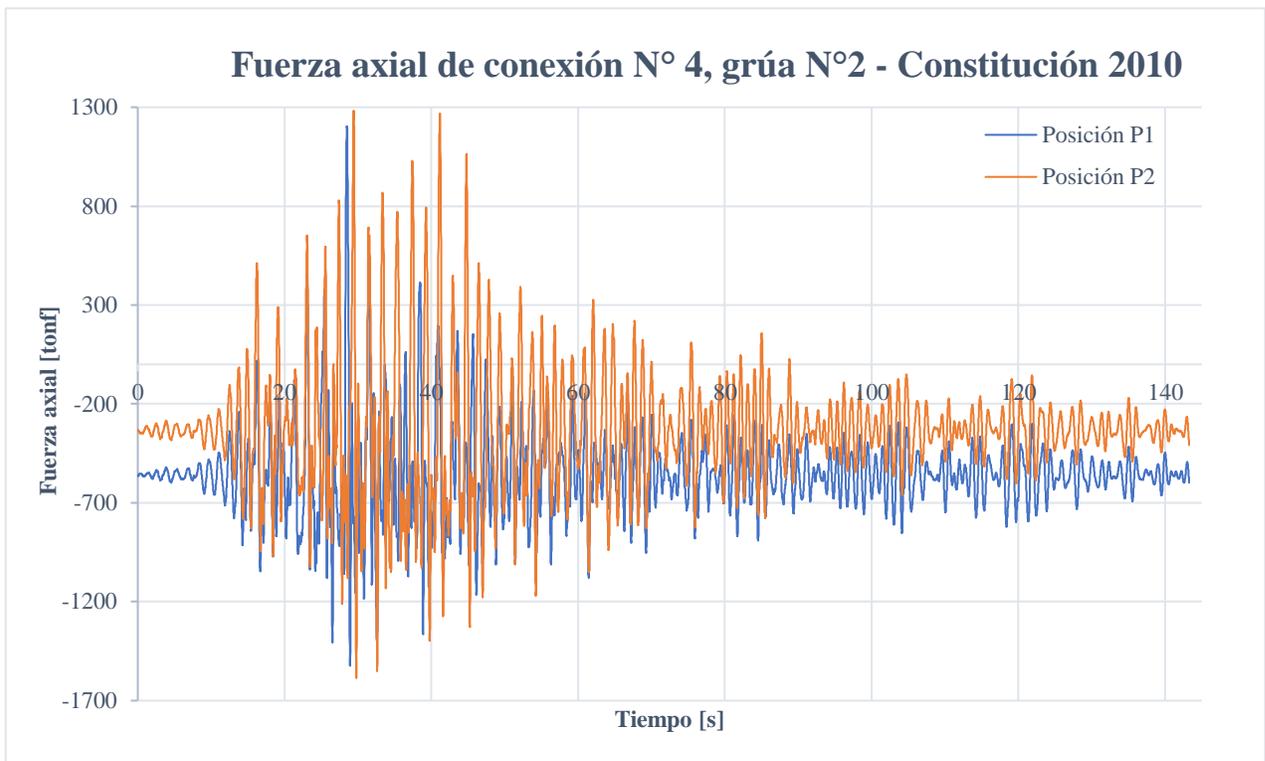


Figura 6.5: Fuerza axial de la conexión N°4, grúa N°2, registro de Constitución 2010.

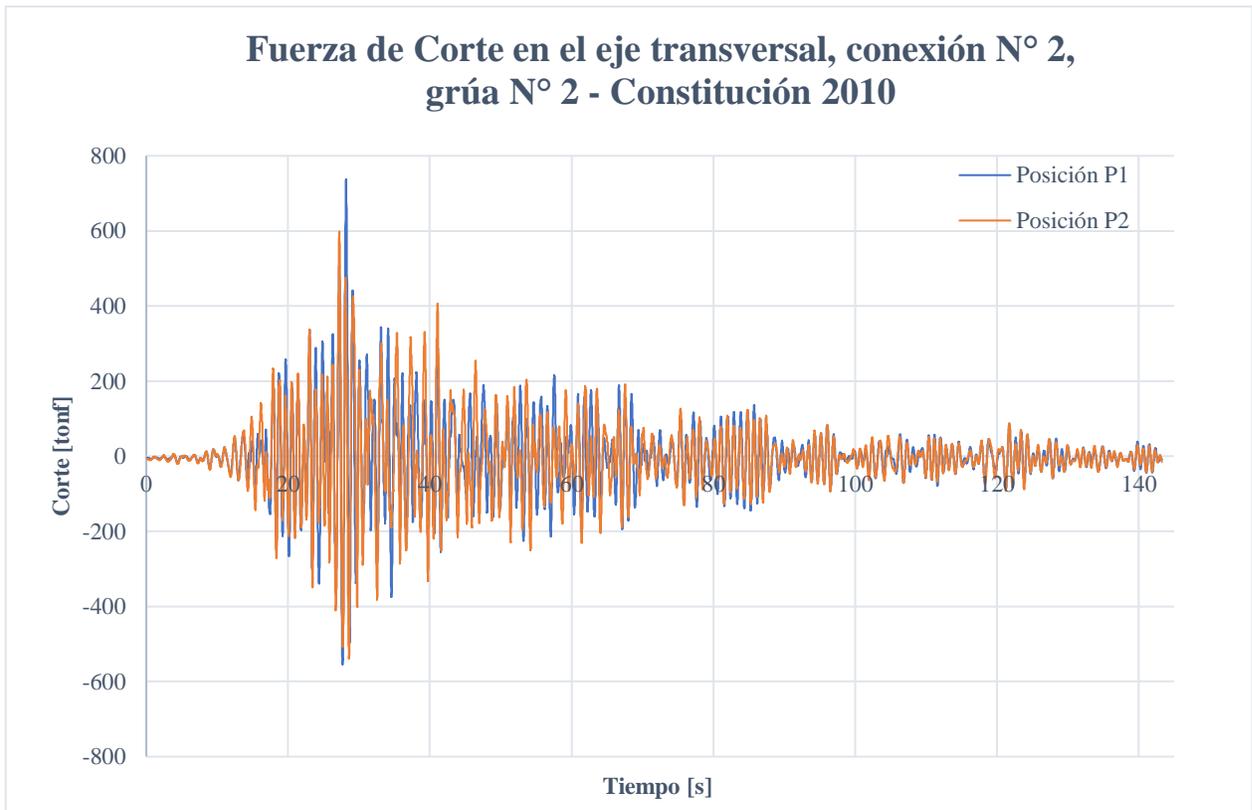


Figura 6.6: Fuerza de corte en el eje transversal, conexión N°2, grúa N°2, registro de Constitución 2010.

6.3. Análisis de Resultados

6.3.1. Modal – espectral

La disposición 13.16 de la norma NCh2369 actualizada, establece que se puede considerar como indicador de estabilidad suficiente el que no se produzcan tracciones netas en los apoyos de las grúas STS para una condición de demanda sísmica establecida por el espectro elástico de referencia.

El análisis modal – espectral se realizó para la demanda sísmica establecida por el espectro elástico de la norma NCh2369 debido a que “el levantamiento de los apoyos de las grúas STS corresponde a un tipo de falla que no presenta ningún tipo de ductilidad o sobre-resistencia asociada. Por este motivo un análisis sísmico del conjunto en base a cargas reducidas carece de sentido físico para este fin” (Instituto Nacional de Normalización, 2017).

El cálculo de fuerzas en los elementos de conexión de las grúas STS con el tablero, ejecutado mediante el análisis modal espectral se realiza como verificación preliminar. Los resultados de fuerzas de tracción en los elementos de conexión implican que se deben implementar medidas para evitar el levantamiento de los puntos de apoyo de las grúas STS, entendiendo el levantamiento como la ocurrencia de tracciones verticales.

El diseño del elemento que restrinja el levantamiento de los bogies de las grúas STS, considerará los resultados de fuerzas máximas de tracción y corte en el eje transversal en la conexión grúa – tablero. No se toman en cuenta los esfuerzos de corte en el eje longitudinal, debido a que el desplazamiento de la grúa STS en ese eje no es un problema. Las ruedas de los bogies situadas sobre rieles permiten el libre desplazamiento de la grúa en el eje longitudinal.

Los resultados de la sección 6.1 indican que las máximas fuerzas en la conexión grúa STS – tablero se producen para la posición de grúas N° 2 de la Tabla 5.3. En particular, estos esfuerzos se obtienen para la combinación de demandas sísmicas E_{y1} , establecido en la sección 5.1.5.2, la Figura 6.7 esquematiza la combinación de demandas sísmicas E_{y1} .

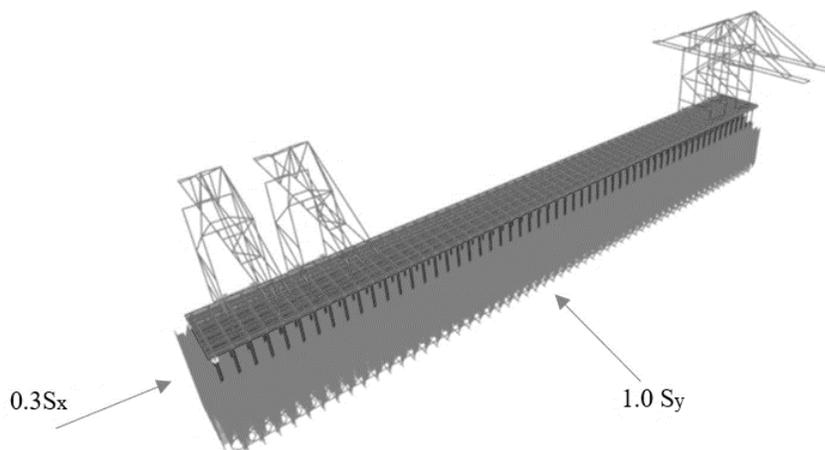


Figura 6.7: Referencia de combinación de demandas sísmicas E_{y1} .

6.3.2. Tiempo – historia

6.3.2.1. Registros de aceleración

Los registros de aceleración que se utilizan para obtener un parámetro de interés, sea este: fuerza axial, corte o desplazamiento en algún punto de la estructura, deben tener magnitudes, distancias a la falla y fuentes del mecanismo del sismo que sean consistentes con aquellos que controlan el sismo de diseño.

En el caso particular de las estructuras estudiadas, la ubicación del proyecto y las características de este motivan el uso de los registros de Constitución 2010, Matanzas 2010 y Llolleo 1985. La ubicación de toma de datos de estos registros es costera y la fuente de mecanismo de los sismos registrados es de tipo interplaca, tal como puede esperarse en el caso de Valparaíso.

La uniformidad en la intensidad de los registros de aceleración se logra mediante la modificación de los registros sísmicos, de manera que los espectros de pseudo-aceleración sean mayores al espectro de referencia, en los casos analizados los registros se amplifican por los factores presentados en la Tabla 5.5.

Como se observa en la Figura 6.8, el registro de Constitución 2010 debe ser amplificado por un factor menor a los otros registros en cuestión. Una de las causas de esto es que existe una menor distancia entre el epicentro del terremoto del 2010 con el lugar de toma de datos. Al ser amplificado por un factor menor, el registro de Constitución representa de mejor manera la referencia esperada del sismo de diseño.

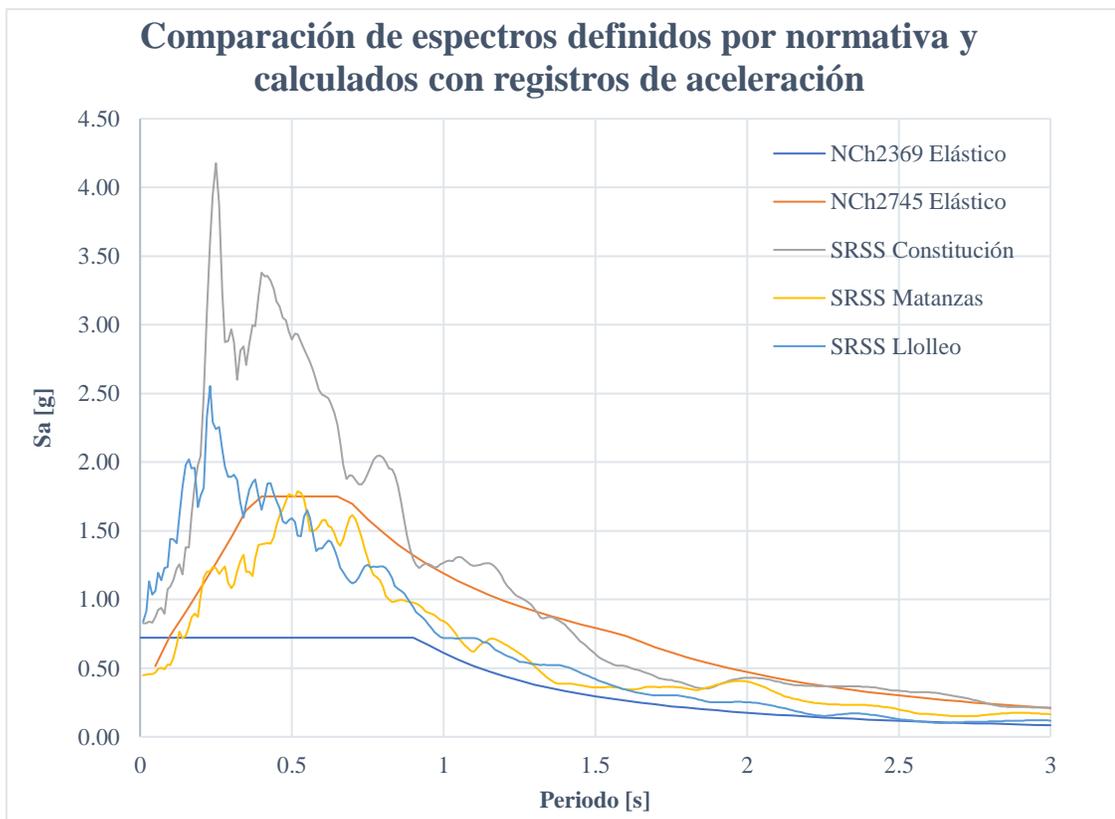


Figura 6.8: Combinación SRSS (sin amplificar) de espectros calculados y espectros elásticos definidos por NCh2369 y NCh2745.

6.3.2.2. Desplazamientos en elemento link – conexión (apoyos sin anclaje)

Al igual que en el caso de determinación de fuerzas, para analizar los desplazamientos del punto superior de la conexión con el elemento link entre la grúa STS y el tablero, se consideran sólo los desplazamientos en el eje transversal y vertical. Lo anterior, debido a que los desplazamientos en el eje longitudinal no constituyen un problema, las ruedas de los bogies situadas sobre rieles permiten el libre desplazamiento de la grúa en el eje longitudinal.

La Figura 6.9 muestra los puntos de conexión que serán descritos en los siguientes párrafos.

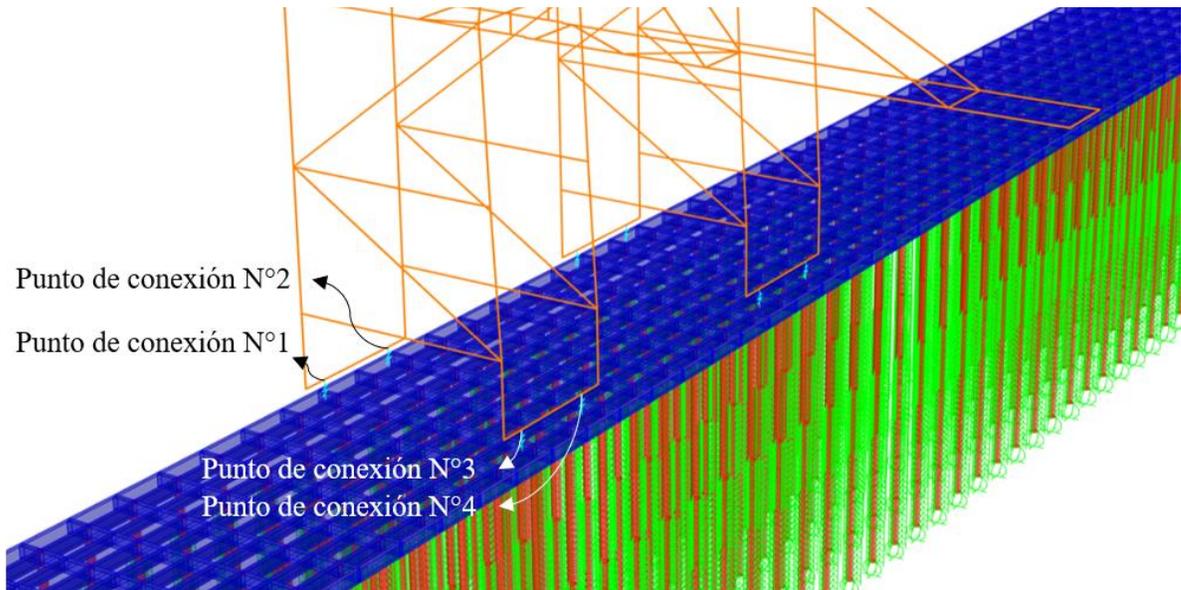


Figura 6.9: Simbología de puntos de conexión de las grúas analizadas.

Los resultados de desplazamientos verticales y transversales de los puntos de apoyo del lado tierra, o sea, los puntos 1 y 2, en general, son similares. Por su parte, los desplazamientos verticales y transversales de los puntos de apoyo del lado mar (puntos 3 y 4) también son similares entre sí. Por lo tanto, se analiza el comportamiento de los apoyos lado tierra y lado mar describiendo los desplazamientos de los puntos 2 y 4.

Los resultados presentados en la sección 6.2.1 indican que los máximos desplazamientos en el eje vertical (levantamientos) ocurren en el punto 2 de la grúa N° 2, en la posición de grúas N° 4 para la demanda sísmica establecida por los registros de aceleración amplificados de Constitución 2010. Específicamente, el desplazamiento vertical máximo es de 0.43 metros entre el segundo 26 y 27 (Figura 6.10). Adicionalmente, a partir de los desplazamientos transversales del punto 2 presentados en la Figura 6.10, se observa que cuando ocurre el desplazamiento vertical máximo del punto 2, el desplazamiento transversal de este es -0.08 metros.



Figura 6.10: Desplazamiento vertical y transversal del punto 2, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.

Por otra parte, cuando ocurre el máximo desplazamiento vertical o levantamiento del punto 2, en el punto 4 existe un desplazamiento vertical de -0.01 metros (Figura 6.11). Adicionalmente, se observa que cuando se levanta el punto 4, por ejemplo, entre los segundos 27 y 28, el desplazamiento vertical del punto 4 es de -0.01 metros aproximadamente.

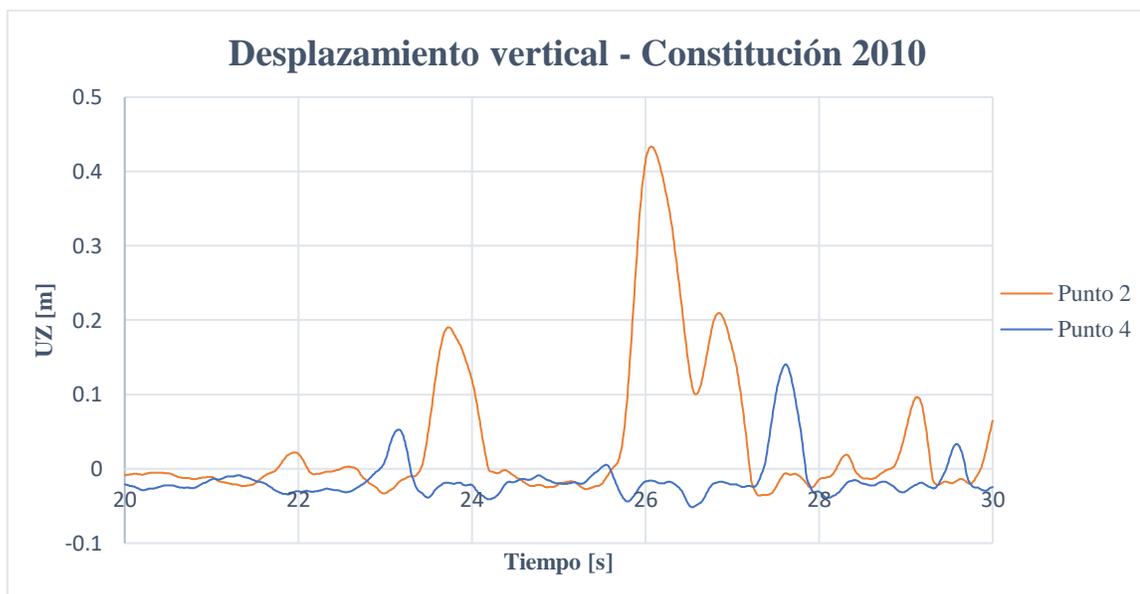


Figura 6.11: Desplazamiento vertical de los puntos 2 y 4, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.

El máximo desplazamiento vertical del punto 4 es de 0.16 metros y ocurre entre el segundo 35 y 36 (Figura 6.12). Al igual que en los casos anteriores, en el instante del máximo levantamiento del punto 4, el punto 2 presenta un desplazamiento vertical de -0.01 metros.

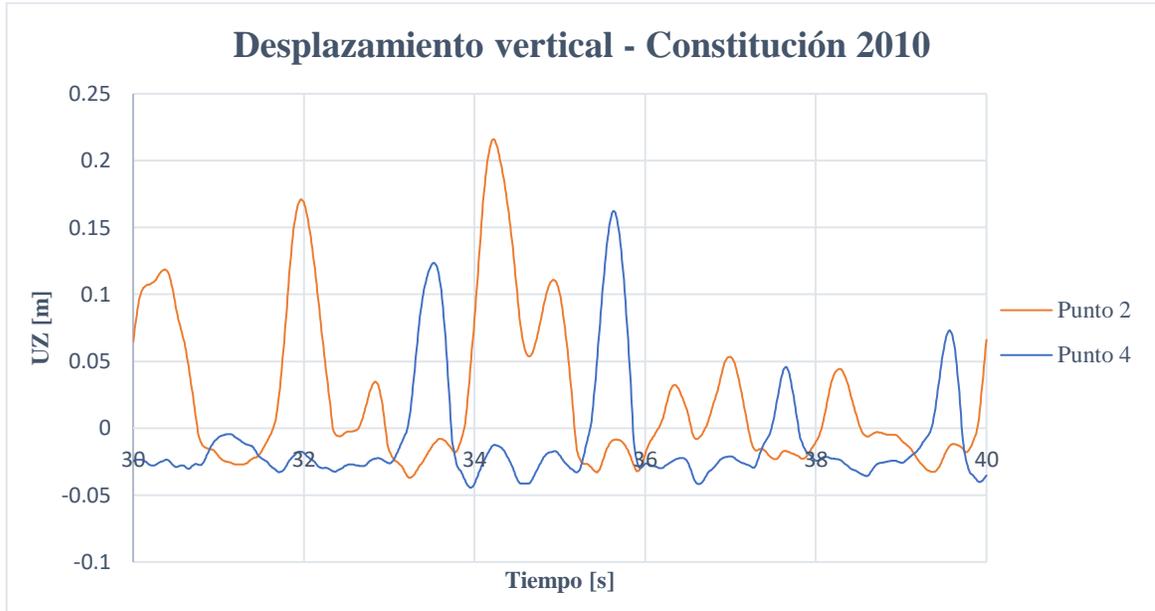


Figura 6.12: Desplazamiento vertical de los puntos 2 y 4, segundos 30 al 40, registro de Constitución 2010.

Como se mencionó en la sección 5.5.3.1, el elemento link – conexión tiene la capacidad de tomar cargas de compresión, las cuales son presentadas en la Figura 6.13. Se observa que entre los segundos 26 y 27 ocurren las máximas fuerzas de compresión en el link 4, mientras que entre los segundos 27 y 28 ocurren las máximas compresiones en el link 2. Por lo tanto, el comportamiento indica que cuando se levanta el apoyo del lado tierra (punto 2), el link de apoyo del lado mar (link 4) concentra las máximas fuerzas de compresión y viceversa.

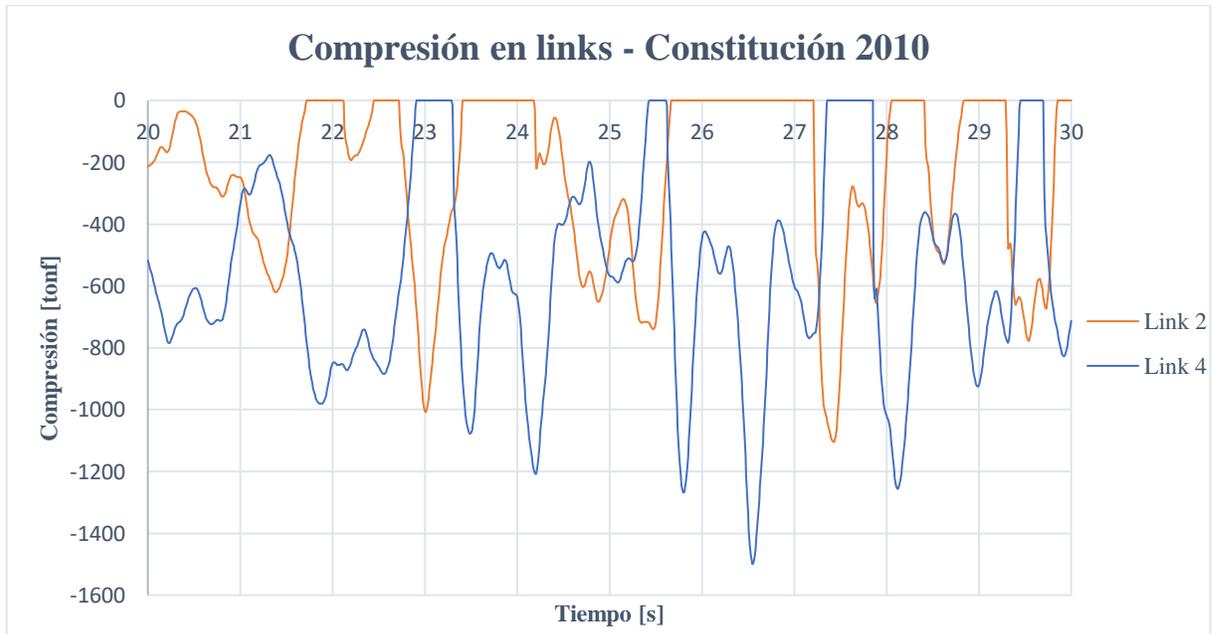


Figura 6.13: Compresión en links 2 y 4, grúa N° 2, registro Constitución 2010.

Finalmente, se presentan los resultados de desplazamientos verticales y transversales de los puntos 3 y 4 de la grúa STS, específicamente entre los segundos 20 y 30. A partir de la Figura 6.14 y Figura 6.15 se observa que los desplazamientos de los puntos 3 y 4 son similares, en otras palabras, están en fase.



Figura 6.14: Desplazamiento vertical de los puntos 3 y 4, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.



Figura 6.15: Desplazamiento transversal de los puntos 3 y 4, segundos 20 al 30, registro de Constitución 2010.

6.3.2.3. Fuerzas en elemento de conexión (apoyos lado mar con anclaje)

El modelo utilizado para determinar las fuerzas de tracción y corte en el eje transversal en los apoyos lado mar, permitiendo el libre levantamiento de los apoyos lado tierra, es la mejor modelo de evaluación que se ha logrado definir en el sentido que, si bien los apoyos lado tierra se levanta libremente en los puntos superiores del link – conexión, en los apoyos lado mar los puntos inferiores del elemento de conexión (anclajes) no se descarrilan. Con lo anterior, se da cumplimiento al espíritu de la norma al no permitir el descarrilamiento total de las grúas STS.

Los resultados presentados en la sección 6.2.2 indican que las máximas fuerzas de tracción y corte en el eje transversal se producen para la demanda sísmica establecida por los registros de aceleración amplificados de Constitución 2010. Específicamente, para la posición P₁ del trolley, sistema de levante y carga levantada, la máxima fuerza de tracción obtenida es de 1203 [tonf], mientras que la máxima fuerza de corte en el eje transversal obtenida es de 738[tonf].

Por otra parte, para la posición P₂ del trolley, sistema de levante y carga levantada, la máxima fuerza de tracción obtenida es de 1282 [tonf], mientras que la máxima fuerza de corte en el eje transversal obtenida es de 598 [tonf].

La Figura 6.16 y la Figura 6.17 muestran el detalle de las fuerzas de tracción y corte en el eje transversal obtenidos en el tiempo, entre los segundos 20 y 30, para las posiciones de cargas P₁ y P₂, respectivamente.

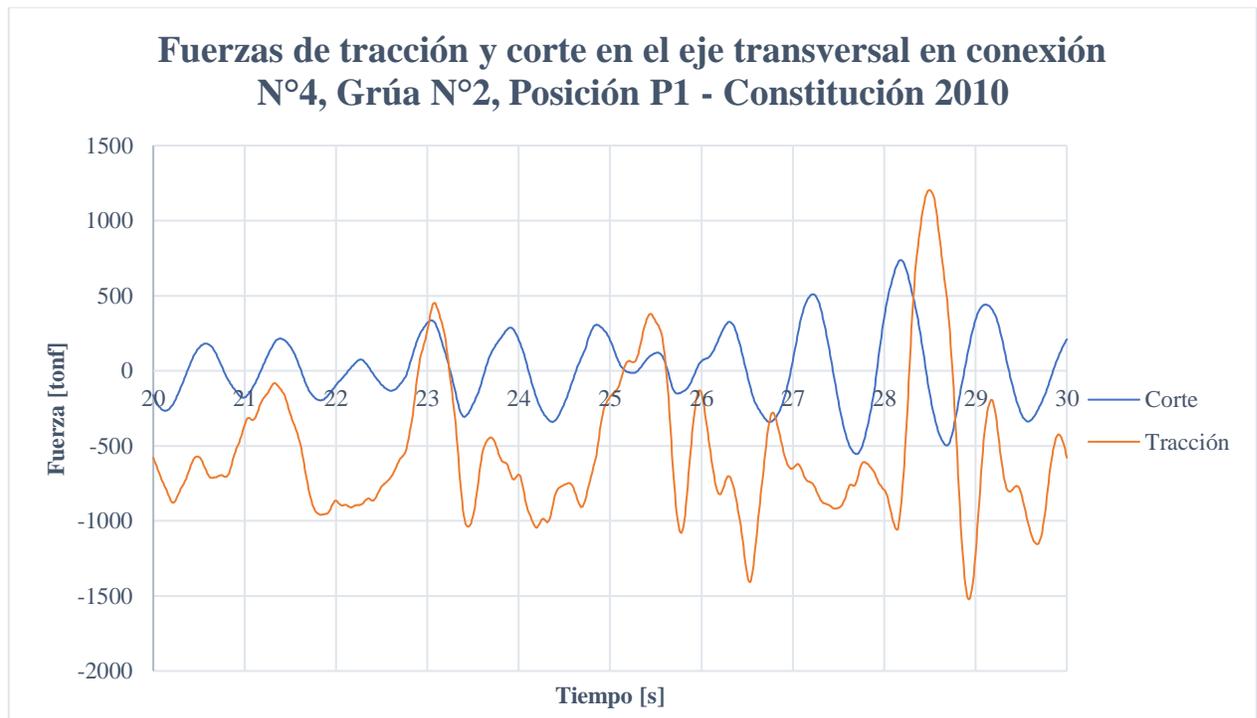


Figura 6.16: Fuerzas de tracción y corte en el eje transversal de la conexión N°4, grúa N°2, posición P1, registro de Constitución.

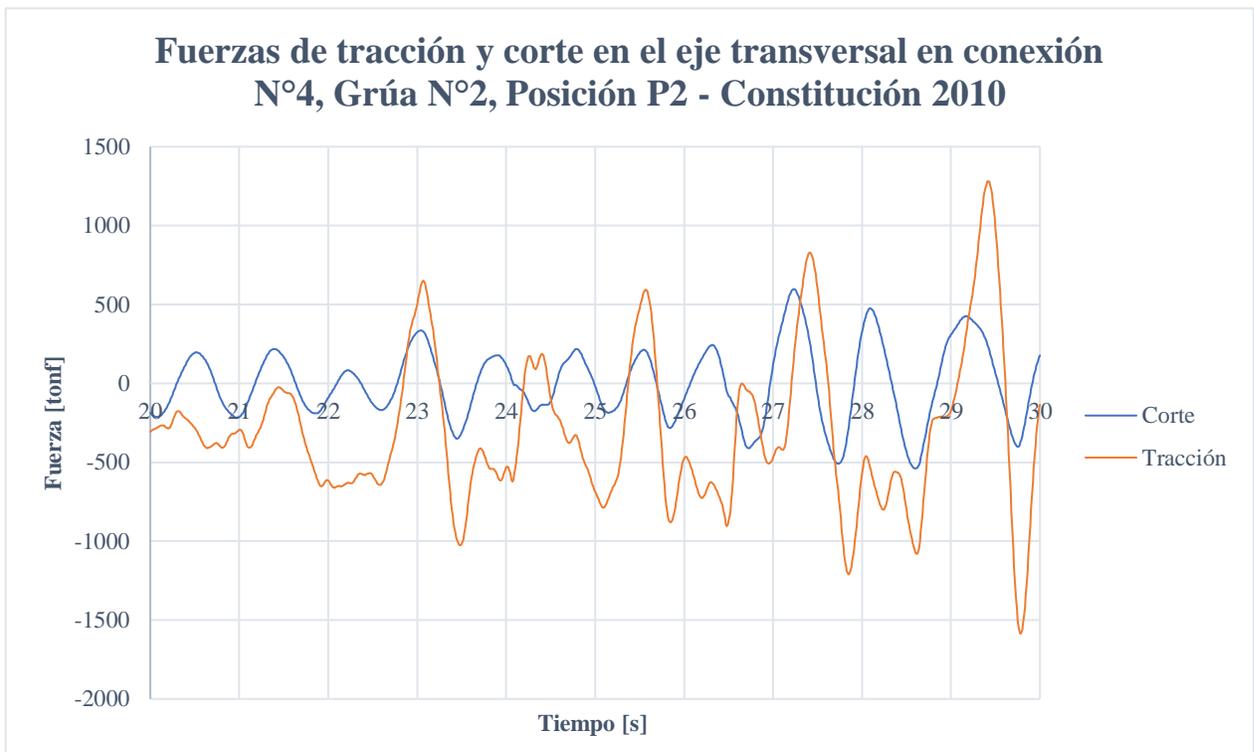


Figura 6.17 Fuerzas de tracción y corte en el eje transversal de la conexión N°4, grúa N°2, posición P2, registro de Constitución.

A partir de lo anterior, se tiene que para la posición P₁ las máximas fuerzas de tracción y de corte en el eje transversal ocurren entre los segundos 28 y 29. Por otra parte, para la posición P₂ la máxima fuerza de tracción ocurre entre los segundos 29 y 30, mientras que la máxima fuerza en el eje transversal ocurre entre los segundos 27 y 28.

7. ELEMENTO DE FIJACIÓN ANTI – LEVANTE

Se presenta el diseño del elemento que restringe el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS. En primer lugar, haciendo uso de las cargas obtenidas en el Capítulo anterior, se obtienen las cargas de diseño. Además, se presenta el criterio de falla y factores de seguridad a utilizar en el diseño del elemento. Por último, se detalla el proceso de modelado y verificación del elemento en el software ANSYS Workbench 15.

Adicionalmente, se deben diseñar y verificar los elementos que son utilizados al instalar los rieles, estos son: los clamps, pernos de anclaje y placa base. En el Anexo E se detalla el diseño de estos elementos.

7.1. Consideraciones iniciales

En el desarrollo del diseño del elemento que restringe el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS se considera la información contenida en planos proporcionados por la empresa Liebherr (Anexo B). Estos planos corresponden al detalle de una grúa STS, con especial énfasis en el sector de los bogies.

El levantamiento de las ruedas de las grúas STS se restringirá a través de un sistema de anclaje entre los bogies de las grúas STS y el riel por el cual esta circula. Se considerarán ocho elementos de anclaje por bogie, situados de la manera que indica la Figura 7.1, o sea, cuatro anclajes por cada lado del riel.

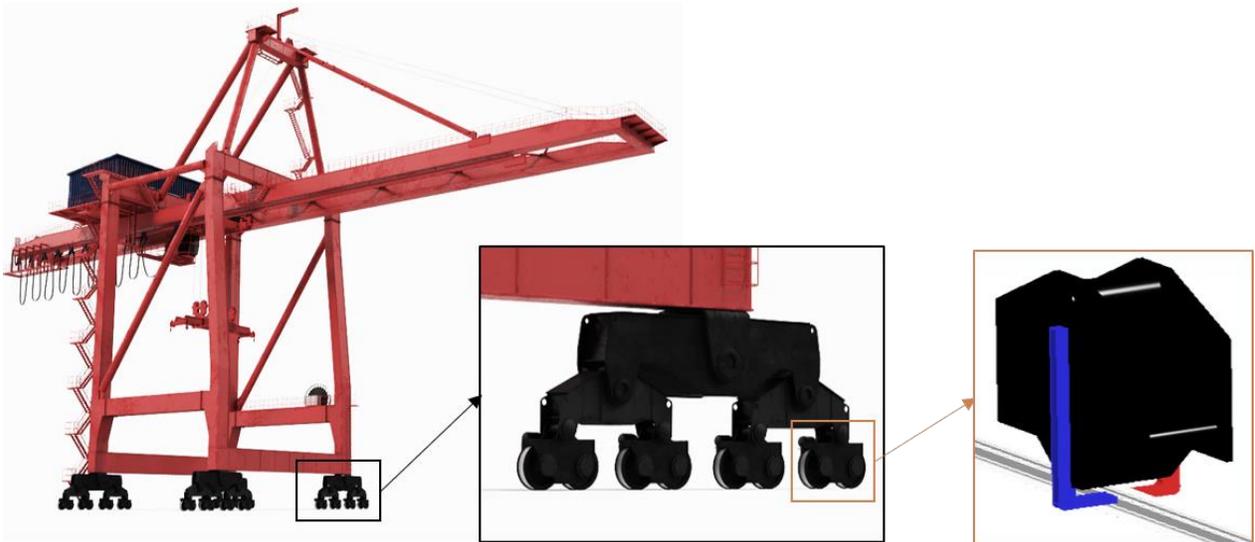


Figura 7.1: Esquema de disposición de sistema de anclaje.

7.2. Cargas de diseño

Para determinar las cargas de diseño se deben considerar los resultados obtenidos de máximas fuerzas de tracción y corte en el eje transversal obtenidas en el Capítulo anterior. La Tabla 7.1 indica la magnitud de las máximas fuerzas de tracción y corte obtenidas en el elemento de conexión entre la grúa STS y el tablero.

Tabla 7.1: Máximas fuerzas obtenidas en la modelación.

Tracción [tonf]	Corte en eje transversal [tonf]
1282	738

El restringir el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS permite que el corte en el eje transversal sea transferido al muelle mediante la interacción rueda – riel. En particular, las pestañas de las ocho ruedas (Figura 7.2) deben ser capaces de resistir las fuerzas de corte que se produzcan en los bogies.

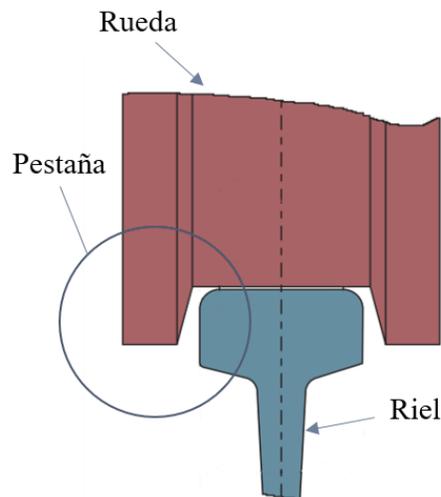


Figura 7.2: Esquema de rueda y riel.

Por lo tanto, para efectos del diseño del elemento que restrinja el levantamiento de los bogies – ruedas de las grúas STS, sólo se considerará la fuerza de tracción obtenida en el elemento de conexión entre la grúa STS y el tablero.

La distribución de esta fuerza en el sistema de anclaje se define por medio del comportamiento de los apoyos de las grúas STS, en términos de sus desplazamientos transversales y verticales.

A partir de los resultados presentados en la sección 6.3.2.2, se tiene que el comportamiento en términos de desplazamientos transversales y verticales de los apoyos (bogies) lado mar es en fase. Dicho en otras palabras, la situación a considerar será cuando los puntos de conexión 3 y 4 de la Figura 7.3 presentan desplazamientos verticales y transversales positivos.

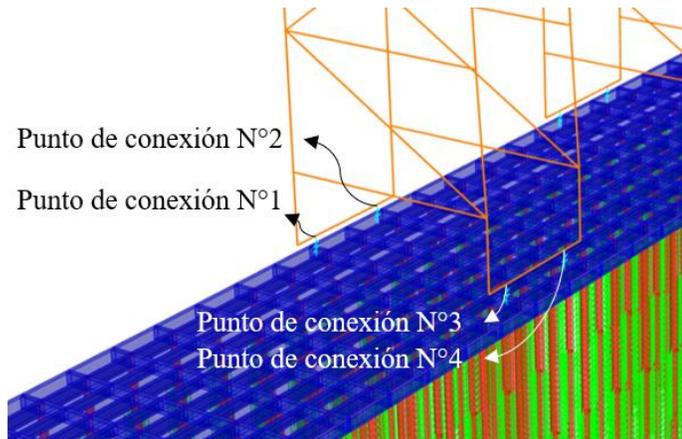


Figura 7.3: Esquema de puntos de conexión de las grúas STS en el modelo.

De esta manera, como criterio de diseño se ha considerado que, de los ocho anclajes que se incorporan a cada bogie, sólo cuatro de estos actuarán simultáneamente. Se está proveyendo un factor de seguridad (Ω) 2, que toma en cuenta que el bogie es un sistema articulado y no es posible asegurar que en el instante que el sismo levanta al bogie con sus ocho ruedas, los ocho anclajes trabajarán simultáneamente.

$$\Omega = 2$$

Por otra parte, el sistema rotulado con el cual están diseñados los bogies (Figura 7.4) permite que las fuerzas de compresión se distribuyan de manera uniforme sobre las ocho ruedas de cada bogie. De manera análoga, las fuerzas de tracción se distribuyen uniformemente en los anclajes que se consideran en el diseño.

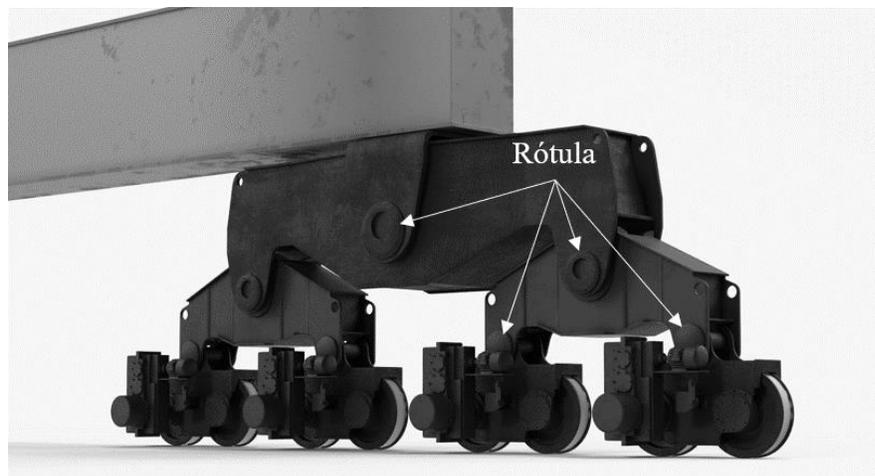


Figura 7.4: Esquema de ubicación de rótulas en los bogies.

Por lo tanto, la carga a considerar en el diseño de un anclaje es:

$$T_{diseño} = \frac{T}{N/\Omega} = \frac{1282 [tonf]}{8/2} = 320.5 [tonf]$$

El método de diseño que se utilizará es el diseño por resistencia. La carga de diseño previamente calculada es una carga sísmica, por lo que se debe mayorar por un factor 1.4.

Luego,

$$T_{diseño} = 1.4 \cdot 320.5 [tonf] = 448.7 [tonf] \quad (LRFD)$$

7.3. Factor de impacto

Debido a la holgura que debe tener el anclaje con respecto al riel (10 mm), al intentar levantarse el bogie se produce un impacto que debe ser considerado en el diseño del anclaje vertical móvil. El factor de impacto considerado es de 1.33, el que es determinado a partir de recomendaciones de la AREMA para estructuras ferroviarias. El factor de impacto que se utilice queda a criterio del diseñador dependiendo de la norma o fuente de recomendación usada.

$$\gamma_i = 1.33$$

El factor de impacto se aplica a la carga de diseño. Por lo tanto,

$$T_{diseño} = \gamma_i \cdot 448.7 [tonf] = 596.8 [tonf]$$

7.4. Factor de seguridad

Debido a las incertidumbres existentes en el desarrollo de diseño del elemento, se utiliza un factor de seguridad (γ) que permite que la resistencia de diseño sea mayor a la requerida:

$$\gamma = \frac{\text{Resistencia de diseño}}{\text{Resistencia requerida}} > 1$$

Teniendo en cuenta el tipo y magnitud de las cargas, la calidad de los materiales a emplear, los efectos de simplificaciones utilizadas en la modelación en SAP2000 de la conexión grúa STS – tablero, las cargas no consideradas en la modelación de las grúas STS (peso propio del bogie, carga que disminuye las tracciones en el elemento de conexión), entre otros, se propone un factor de seguridad de:

$$\gamma = 1.15$$

El factor de seguridad se aplica a la carga de diseño. Por lo tanto, utilizando la carga determinada en la sección 7.3, la carga de diseño queda definida por:

$$T_{diseño} = \gamma \cdot 596.8 [tonf] = 686.3 [tonf]$$

7.5. Criterio de falla

Mediante la modelación en ANSYS, se determinan las tensiones de interés en los elementos. En primer lugar, se tienen los esfuerzos normales (σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz}) y los esfuerzos tangenciales (τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} y τ_{zy}) representados en el tensor de tensiones de la Figura 7.5.

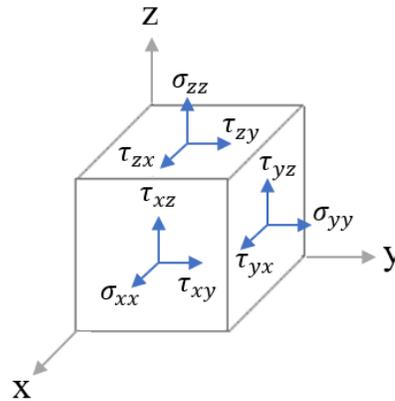


Figura 7.5: Componentes del tensor de tensiones.

A partir de los esfuerzos normales y tangenciales se pueden determinar las tensiones principales σ_1 , σ_2 y σ_3 . El máximo y mínimo de este conjunto representan los máximos esfuerzos de tracción (σ_{max}) y compresión (σ_{min}) a la que es sometido el elemento.

$$\sigma_{max} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

$$\sigma_{min} = \min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

Donde σ_1 = Tensión principal del tensor de tensiones en la dirección 1.

σ_2 = Tensión principal del tensor de tensiones en la dirección 2.

σ_3 = Tensión principal del tensor de tensiones en la dirección 3.

- Tensión de Von Mises

En materiales dúctiles el fallo ocurre cuando el material alcanza la tensión de fluencia, a partir de la cual se produce una elevada deformación permanente. Las principales teorías de fallo para materiales dúctiles son: la teoría del esfuerzo cortante máximo (Tresca), la teoría de distorsión máxima (Von Mises) y la teoría de Coulomb – Mohr.

El criterio de falla elástico que se utilizará para evaluar el elemento de anclaje que restringe el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS es el propuesto y desarrollado por Von Mises. La tensión de Von Mises se calcula a partir de las tensiones principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) del tensor de tensiones, el desarrollo matemático correspondiente da como resultado una tensión equivalente que debe ser menor que la tensión de fluencia para que no se produzca el fallo.

La siguiente expresión permite calcular la tensión de Von Mises:

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}}$$

Luego, para que en un elemento de acero no se produzca el fallo, se debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$\sigma_{vM} < \Phi \cdot F_y \text{ (LRFD - AISC)}$$

Donde σ_{vM} : Tensión de Von Mises máxima en el elemento.

Φ : Factor de resistencia igual a 0.9 (LRFD).

F_y : Tensión de fluencia del elemento.

Por otra parte, para que no se produzca el fallo en la soldadura, se debe cumplir con la siguiente desigualdad:

$$\sigma_{vM} < \Phi \cdot 0.6 \cdot F_{EXX}$$

Donde σ_{vM} : Tensión de Von Mises máxima en el elemento.

Φ : Factor de resistencia igual a 0.75 (LRFD).

F_{EXX} : Resistencia nominal de la soldadura.

7.6. Diseño y modelación en ANSYS

En esta sección se presentan la geometría y diversas condiciones aplicadas en la modelación de los elementos en el software ANSYS Workbench 15.

La modelación consta del anclaje que restringe el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS, el riel de tipo CR135, los clamps utilizados para anclar el riel y la parte de los bogies que interactúa directamente con el sistema de anclaje. A estos elementos se les aplican las condiciones de fuerzas, contactos y apoyos que se detallan a continuación.

7.6.1. Geometría del modelo

En primer lugar, se presentan diferentes vistas del conjunto de elementos modelados.

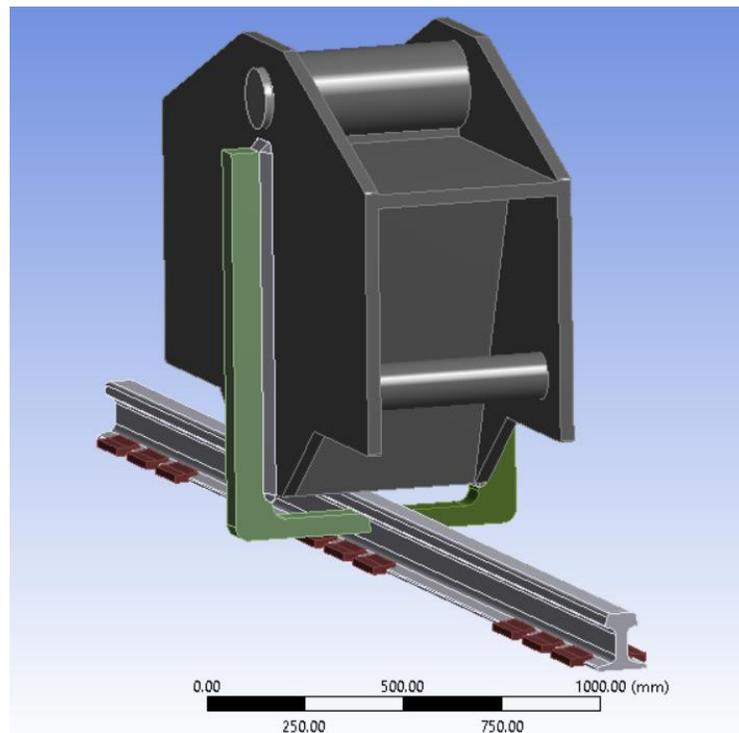


Figura 7.6: Vista tridimensional de los elementos modelados.

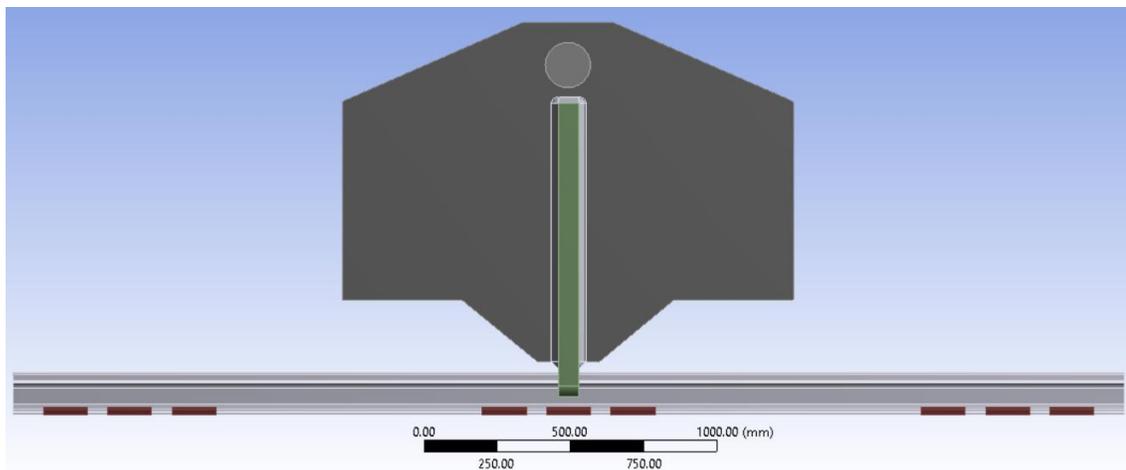


Figura 7.7: Vista lateral de los elementos modelados.

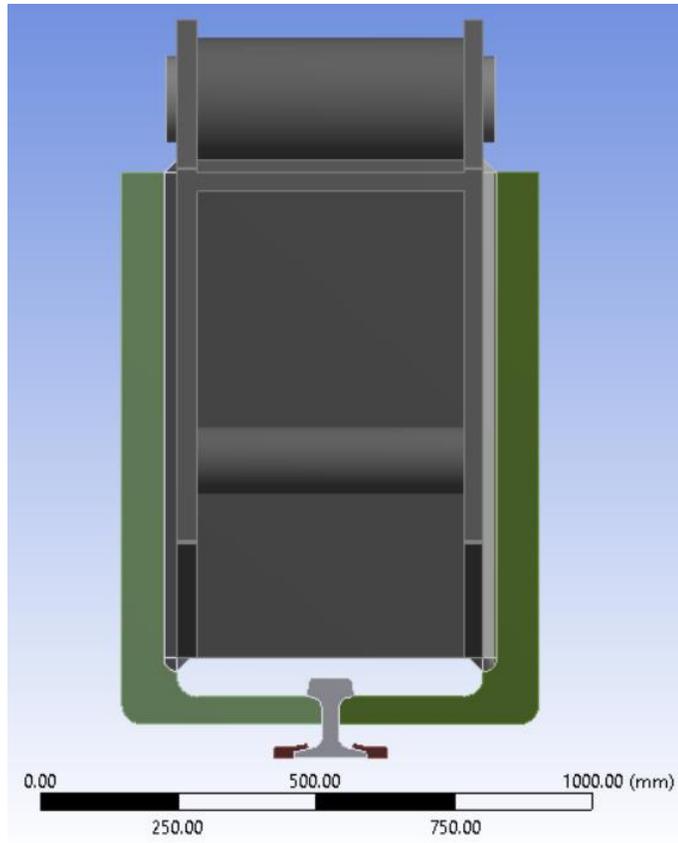


Figura 7.8: Vista frontal de los elementos modelados.

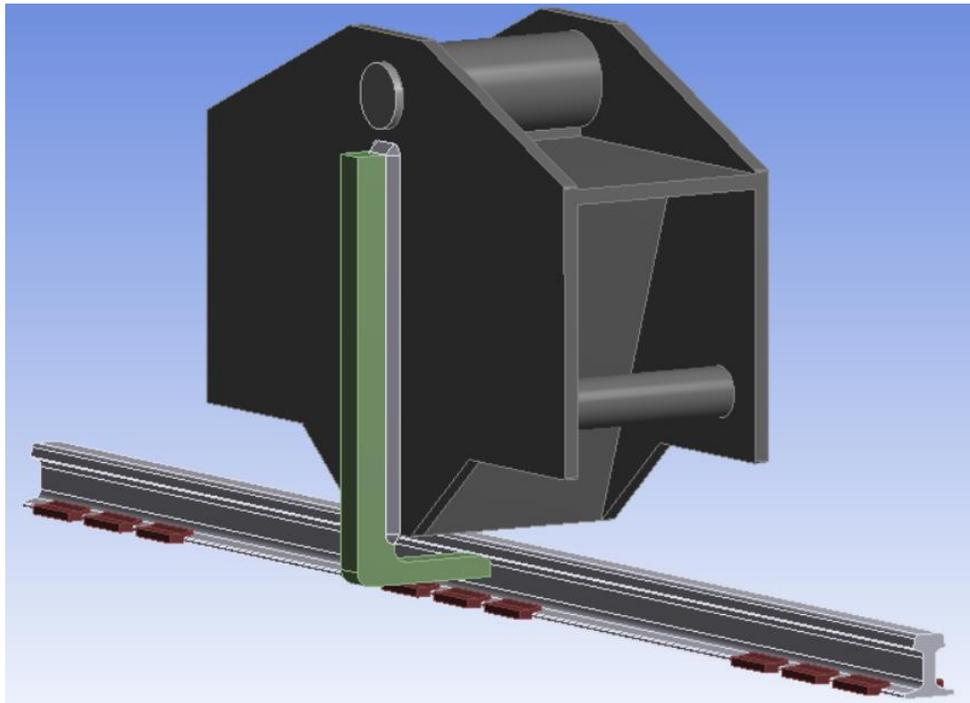


Figura 7.9: Vista tridimensional del modelo considerando un solo anclaje.

7.6.1.1. Anclaje

El elemento que restringe el levantamiento de las ruedas – bogies de las grúas STS tiene la forma que se observa en la Figura 7.10. Para ejecutar el análisis se considera la aplicación de la carga de diseño, la cual debe ser resistida por el elemento de anclaje. La materialidad del anclaje es acero ASTM A572 gr 55, que posee una tensión de fluencia de 380 [MPa]. Las dimensiones del elemento de anclaje se detallan en la Figura 7.11.

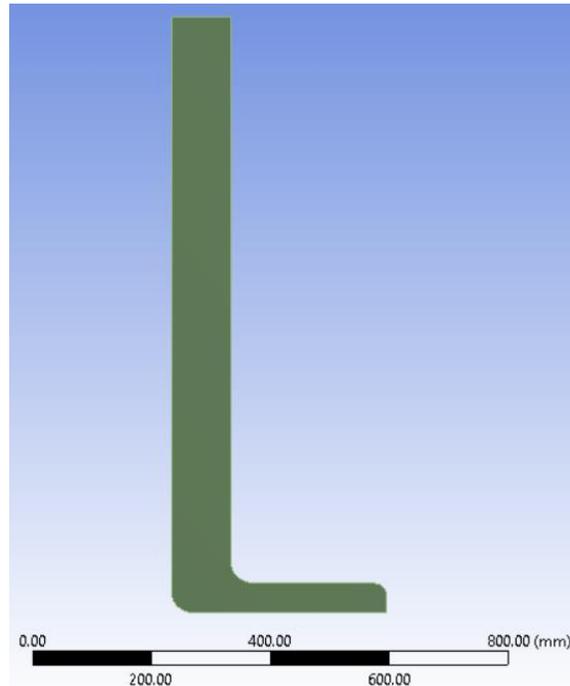


Figura 7.10: Vista frontal de elemento de anclaje.

ANCLAJE VISTA FRONTAL

ANCLAJE VISTA LATERAL

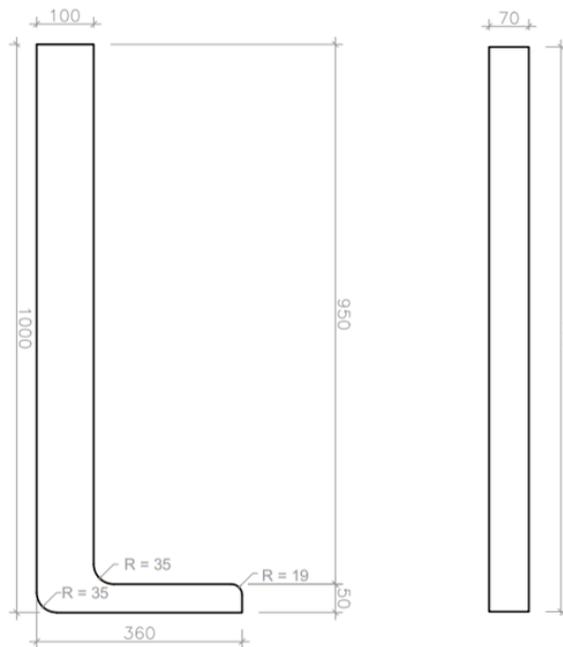


Figura 7.11: Dimensiones del elemento de anclaje.

7.6.1.2. Bogie

A partir de la geometría observada en los planos, se procede a modelar los elementos que forman parte de la interacción entre el bogie y el sistema de anclaje, estos se observan en la Figura 7.12.

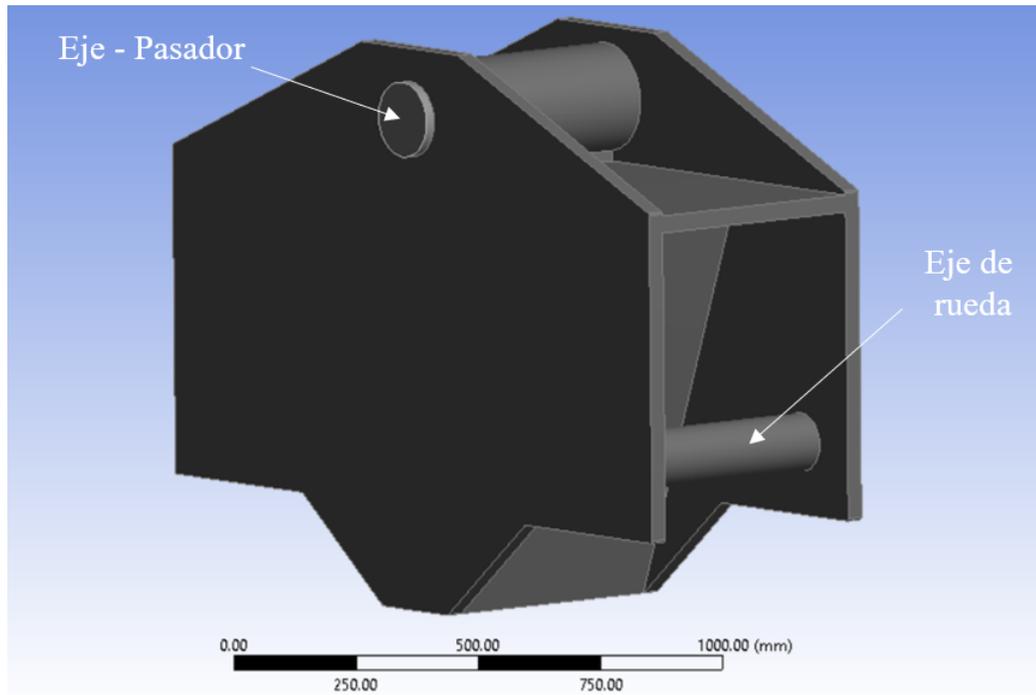


Figura 7.12: Vista tridimensional de elementos del bogie modelado.

7.6.1.3. Soldadura

En la Figura 7.13 se observa la soldadura modelada entre el anclaje y el bogie.

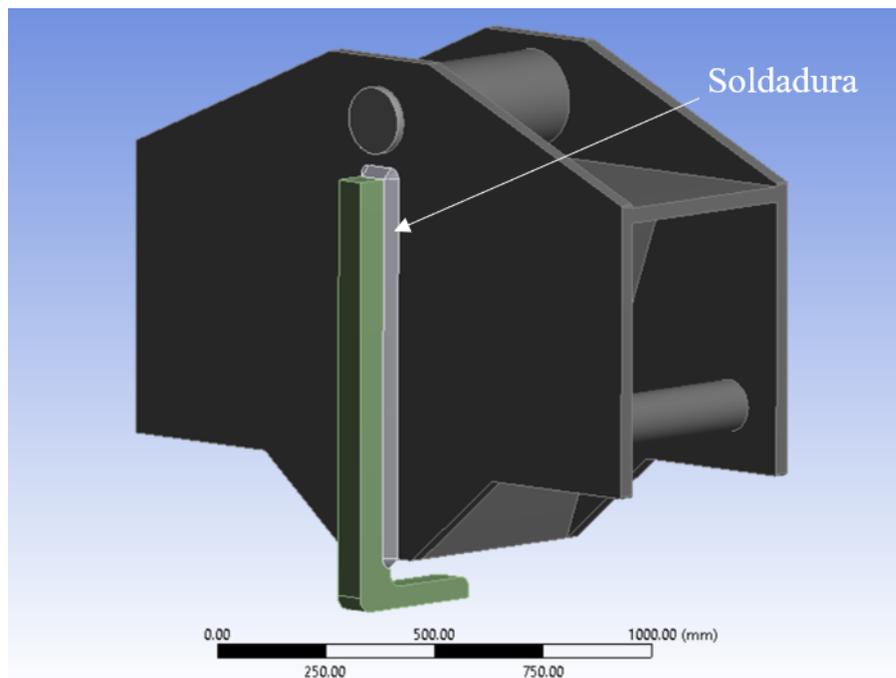


Figura 7.13: Vista tridimensional del anclaje, bogie y soldadura.

7.6.1.4. Riel

Como se mencionó anteriormente, el riel utilizado corresponde a uno tipo CR 135. En la modelación de los elementos se considera un tramo de 3.8 metros lineales de riel. Las siguientes figuras muestran la geometría y forma del riel.

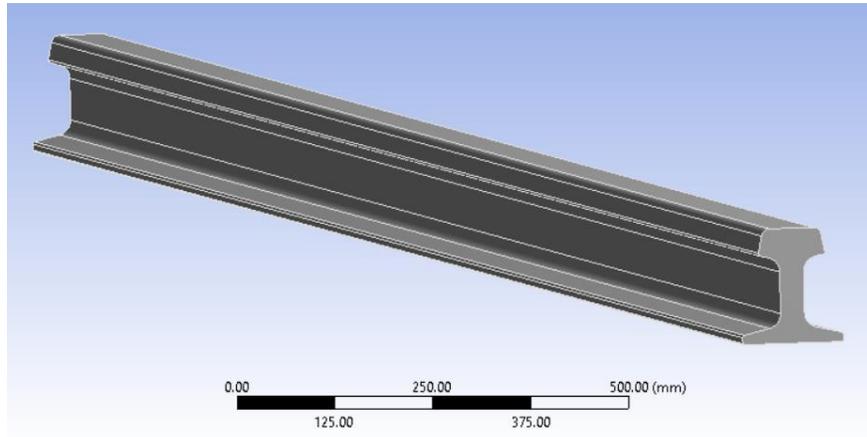


Figura 7.14: Vista tridimensional del riel modelado.

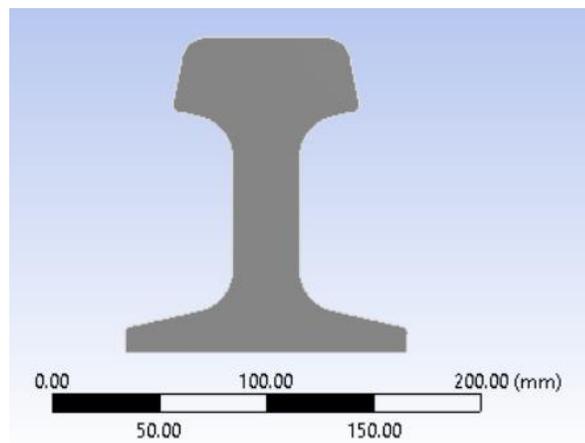


Figura 7.15: Vista frontal del riel modelado.

7.6.1.5. Clamps o grapas

Los clamps considerados se presentan en las siguientes figuras.

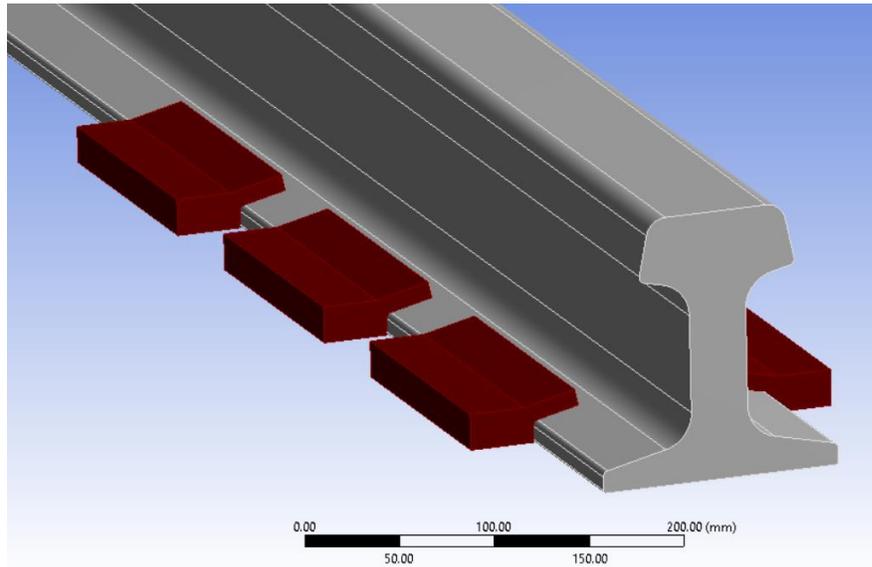


Figura 7.16: Vista tridimensional de clamps y riel.

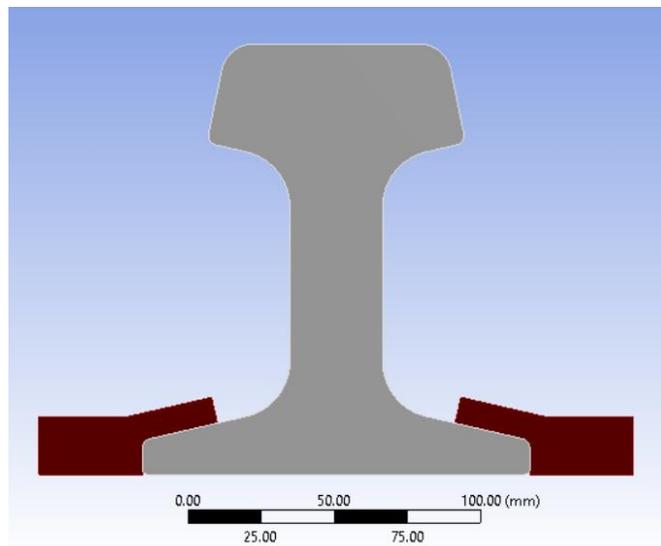


Figura 7.17: Vista frontal de clamps y riel.

7.6.2. Mallado

El mallado de los elementos modelados se ejecuta con la alternativa de mallado automático que posee el software. Se realizó un mallado más fino en las zonas más complejas. El mallado resultante se presenta en las siguientes figuras:

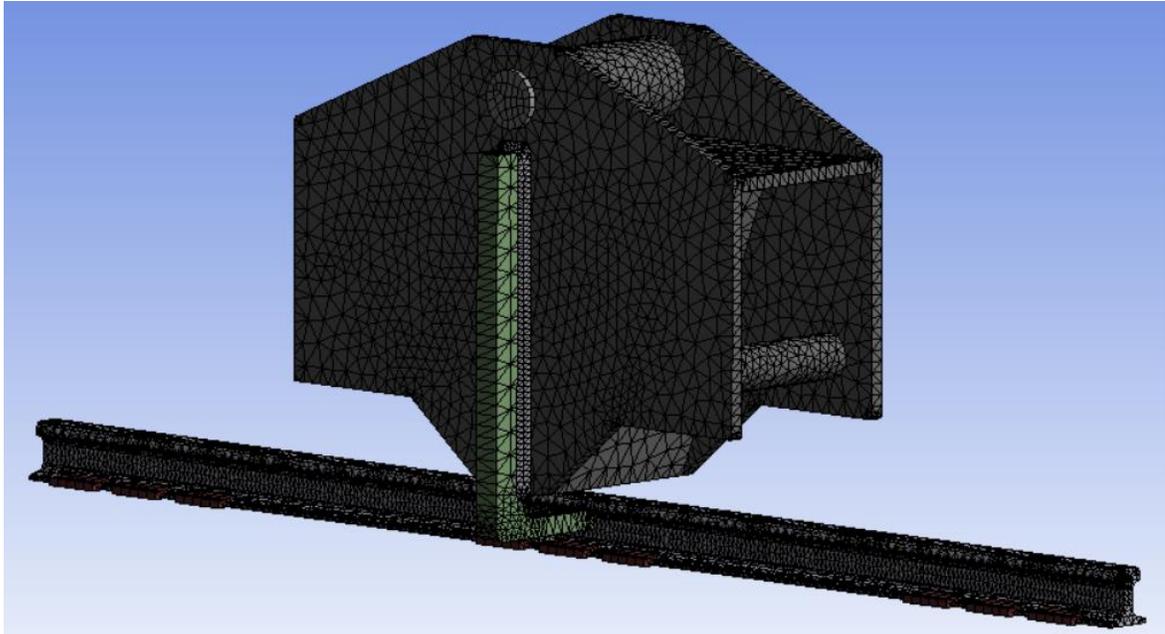


Figura 7.18: Vista tridimensional del mallado del modelo.

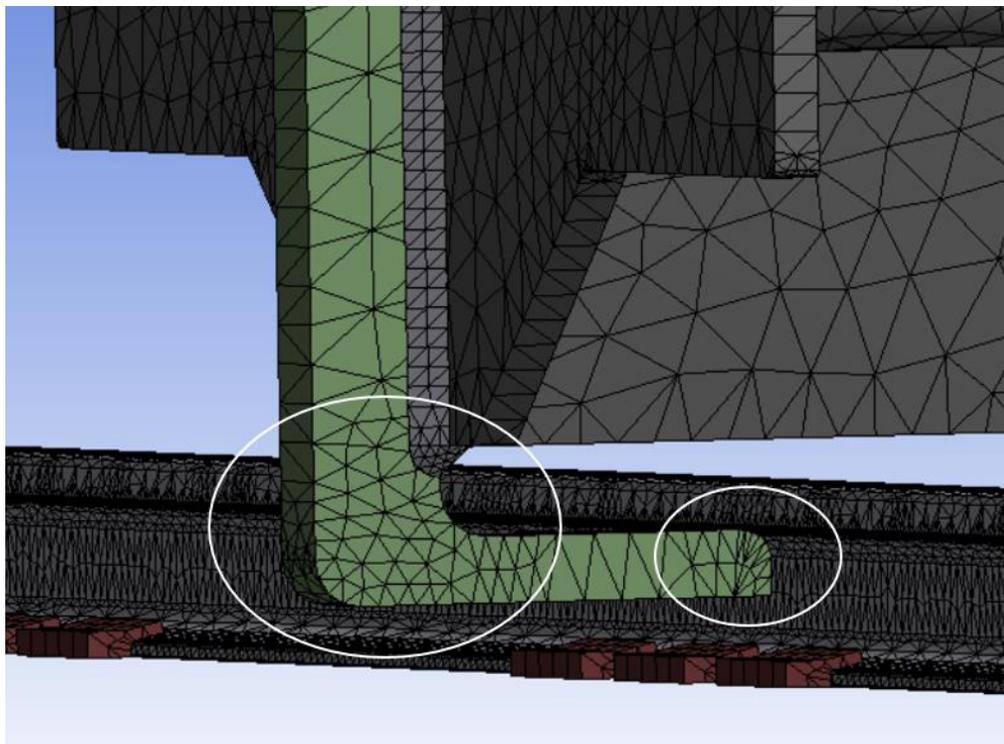


Figura 7.19: Detalle del refinamiento del mallado en anclaje.

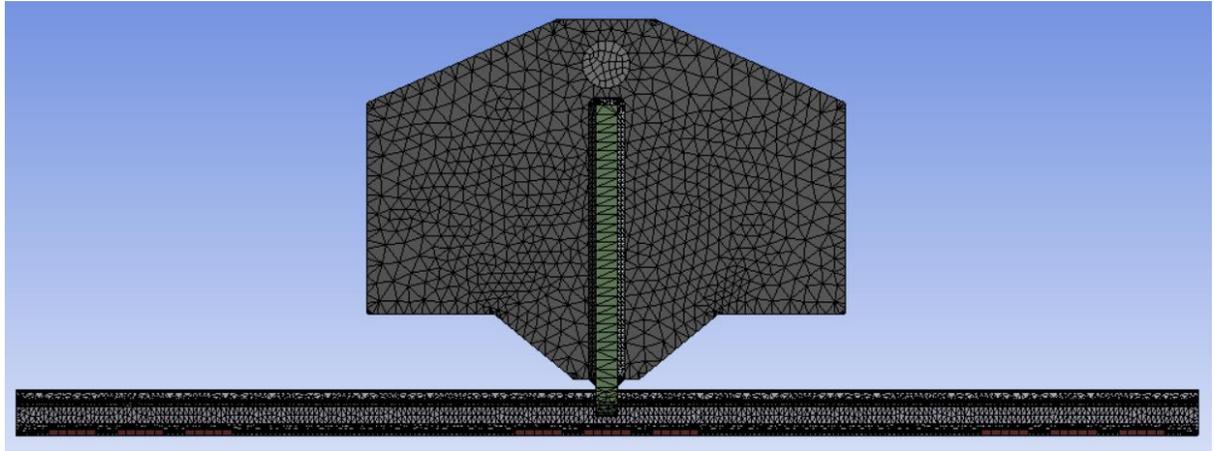


Figura 7.20: Vista lateral del mallado del modelo.

7.6.3. Condiciones del modelo

7.6.3.1. Cargas del modelo

La carga de diseño (686.3 [tonf]) se aplica en el sector del pasador, específicamente en tres puntos (con magnitud de un tercio de la carga de diseño). En la Figura 7.21 se muestran los puntos de aplicación de la carga de diseño.

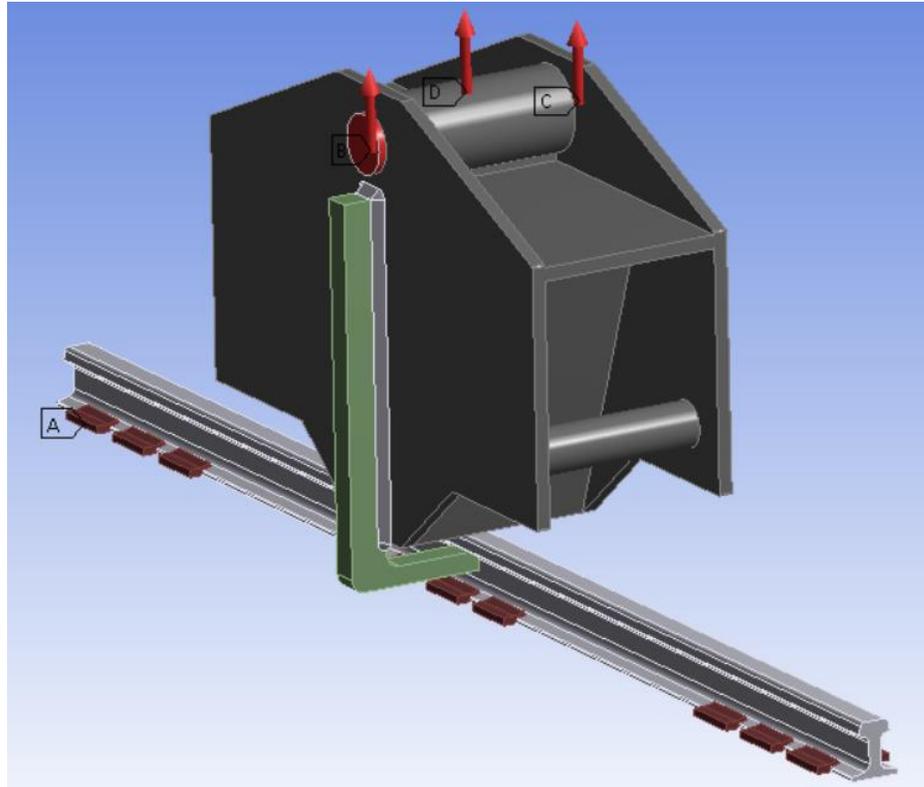


Figura 7.21: Detalle de condición de carga en el modelo.

7.6.3.2. Contactos entre elementos

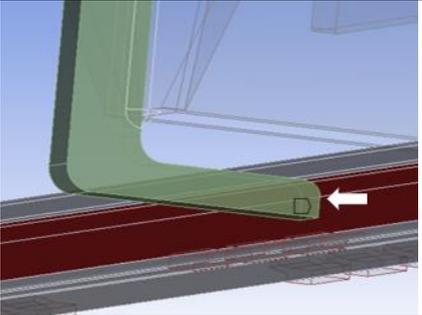
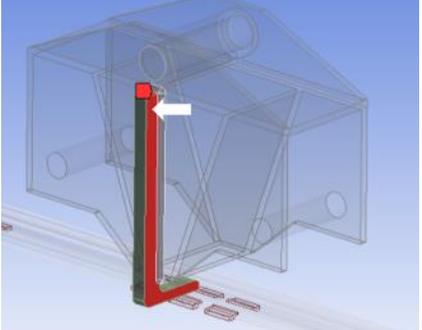
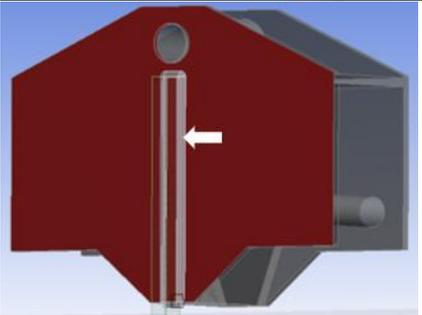
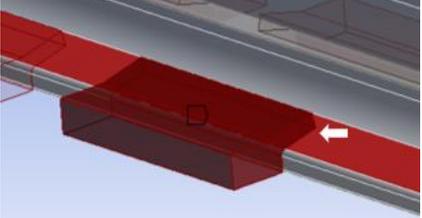
Los tipos de contactos utilizados en la modelación son:

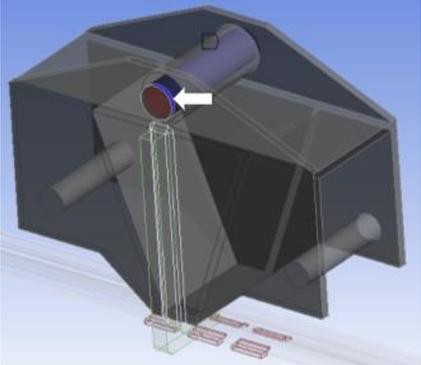
Tabla 7.2: Tipos de contactos utilizados en la modelación.

Tipo de contacto	Separación de elementos en dirección normal	Deslizamiento de elementos en dirección tangencial
Bonded	No	No
Rough	Si	No

Las condiciones de contacto entre los distintos elementos modelados se presentan en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3: Contactos entre los elementos modelados.

Elementos en contacto	Tipo de contacto	Zona de contacto
Anclaje – Riel	Rough	
Anclaje – Soldadura	Bonded	
Soldadura – Bogie	Bonded	
Clamp – Riel	Bonded	

Pasador – Bogie	Rough	
-----------------	-------	--

7.6.3.3. Apoyos del modelo

Las zonas consideradas como apoyos fijos (fixed support en el software) corresponden a las caras inferiores de los clamps (Figura 7.22).

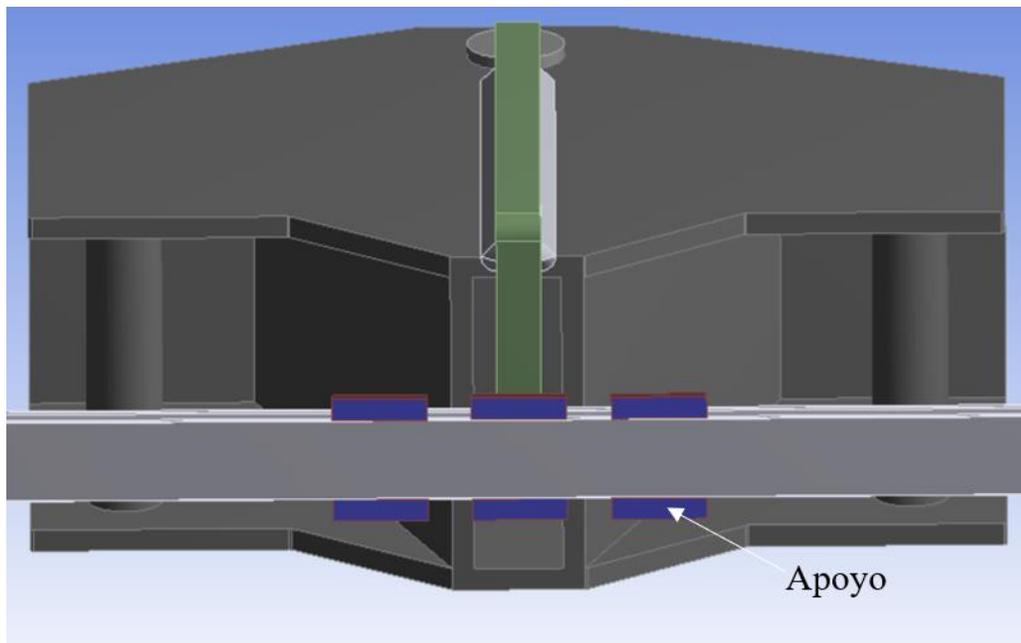


Figura 7.22: Detalle de condición de apoyos en el modelo.

7.7. Resultados de la modelación en ANSYS

7.7.1. Tensiones en el anclaje

En la Figura 7.23 se muestra la distribución de tensiones de Von Mises en el elemento de anclaje, según el análisis ejecutado en el software ANSYS. Notar que el resto de los elementos modelados fueron suprimidos.

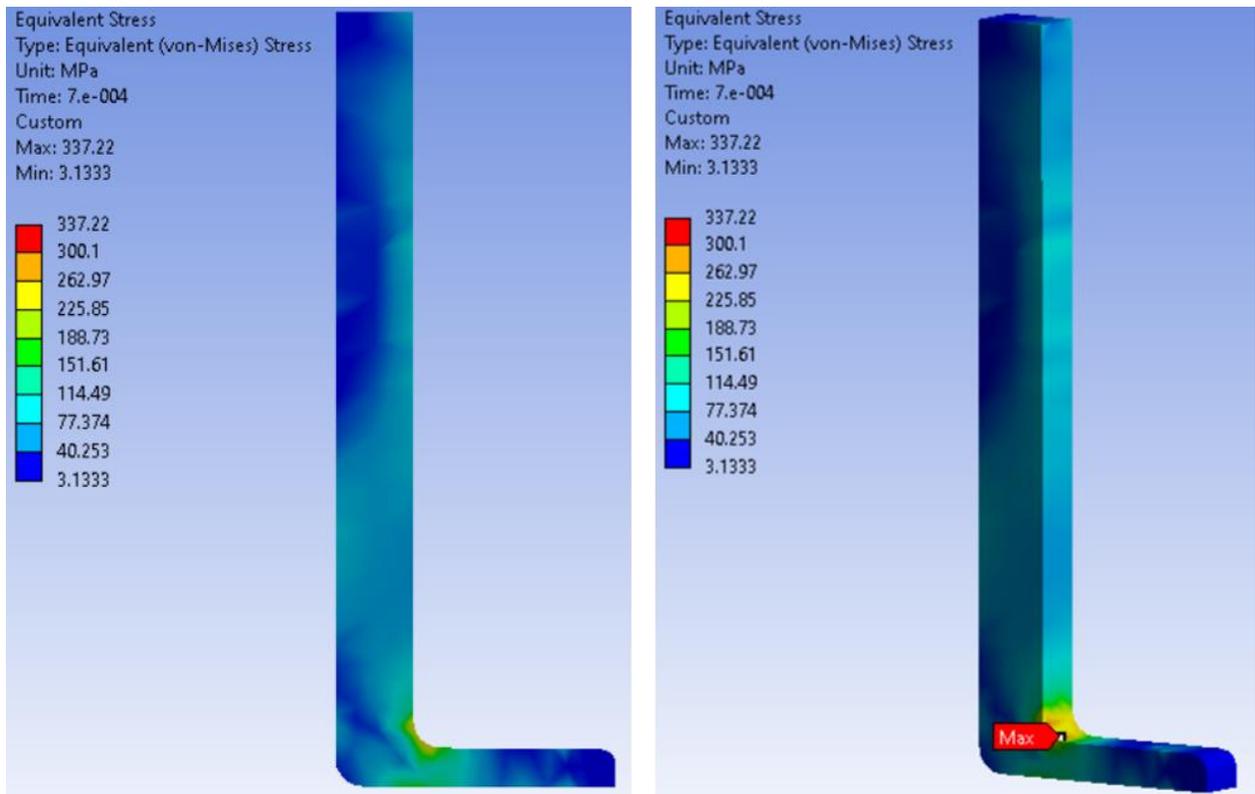


Figura 7.23: Distribución de tensiones de Von Mises en el elemento de anclaje.

Los resultados indican que la máxima tensión de Von Mises en el anclaje es de 337.22 [MPa], ubicado en el sector de mayor sollicitación debido a la curvatura existente y la forma del elemento. El acero utilizado en el elemento de anclaje corresponde a un acero ASTM A572 gr 55, que posee una tensión de fluencia de 380 [MPa]. Por lo tanto, según el criterio de falla en materiales dúctiles, se tiene que el elemento cumple.

$$\sigma_{vM} < 0.9 \cdot F_y$$

Donde $\sigma_{vM} = 337.22$ [MPa] y $0.9 \cdot F_y = 342$ [MPa].

7.7.2. Tensiones en la soldadura

En la Figura 7.24 y Figura 7.25 se muestra la distribución de tensiones de Von Mises en la soldadura, según el análisis ejecutado en el software ANSYS. Notar que la máxima tensión indicada en la Figura 7.24.a corresponde a la máxima tensión de Von Mises de la soldadura.

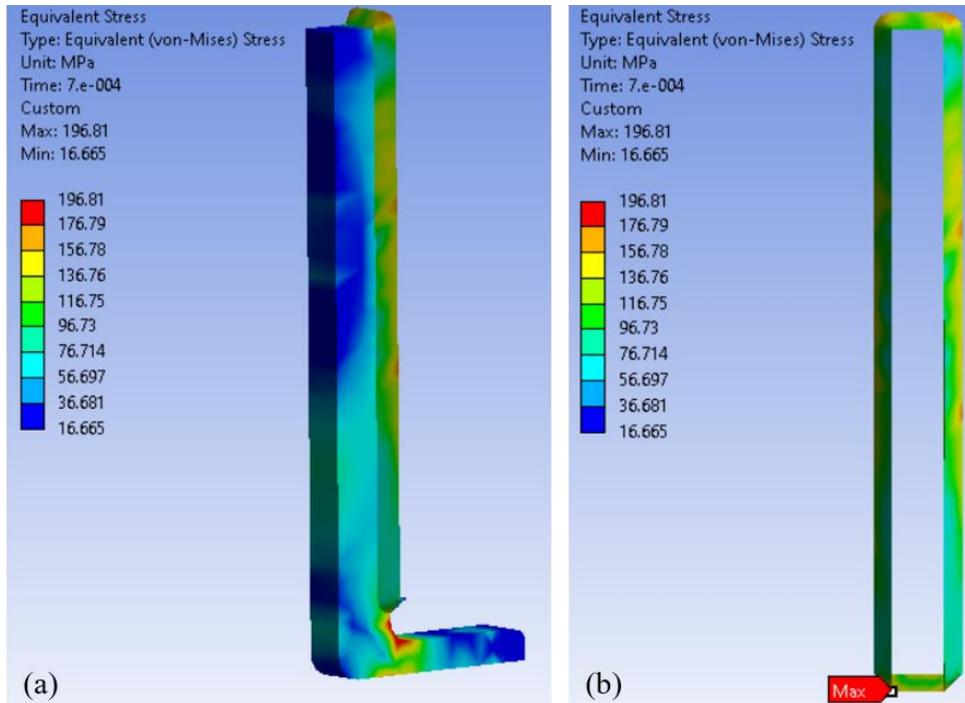


Figura 7.24: Distribución de tensiones de Von Mises (a): De soldadura y anclaje. (b) De soldadura.

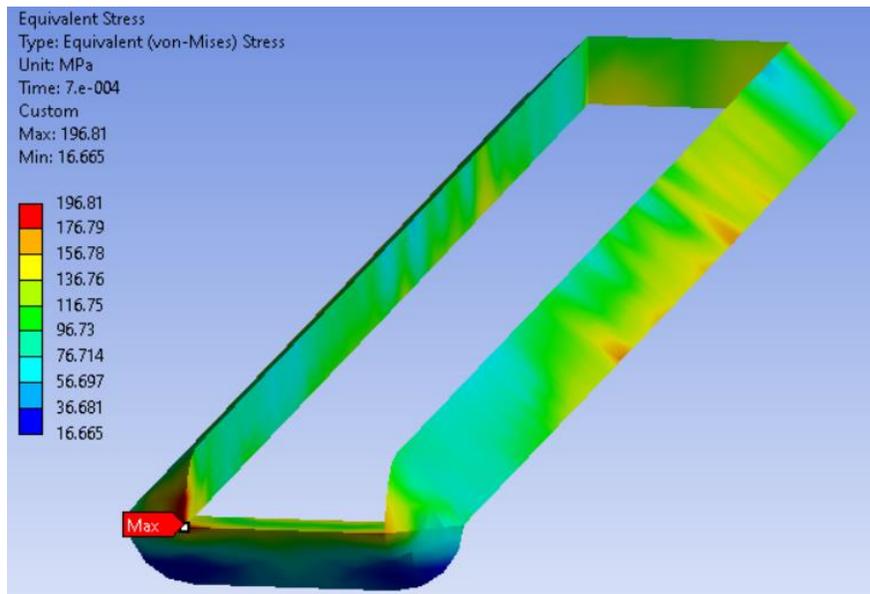


Figura 7.25: Distribución de tensiones de Von Mises en soldadura, detalle de sector de contacto inferior entre la soldadura y el anclaje.

Los resultados indican que la máxima tensión de Von Mises en la soldadura es de 196.81 [MPa], ubicado en el sector de contacto inferior entre la soldadura y el anclaje. La soldadura utilizada corresponde a un filete de soldadura E70, que posee resistencia nominal de 483 [MPa]. Por lo tanto, según el criterio de falla de la soldadura, se tiene que el elemento cumple.

$$\sigma_{vM} < 0.75 \cdot 0.6 \cdot F_{EXX}$$

Donde $\sigma_{vM} = 196.81$ y $0.75 \cdot 0.6 \cdot F_{EXX} = 217.4$ [MPa].

7.8. Análisis de resultados ANSYS

7.8.1. Soldadura

La zona de contacto inferior entre la soldadura y el anclaje es un sector crítico que debe ser estudiado con especial atención en el diseño de los elementos. A partir de los análisis realizados, se concluye que la forma de la soldadura debe ser continua, uniendo los filetes de soldadura en el sector crítico (Figura 7.26.a).

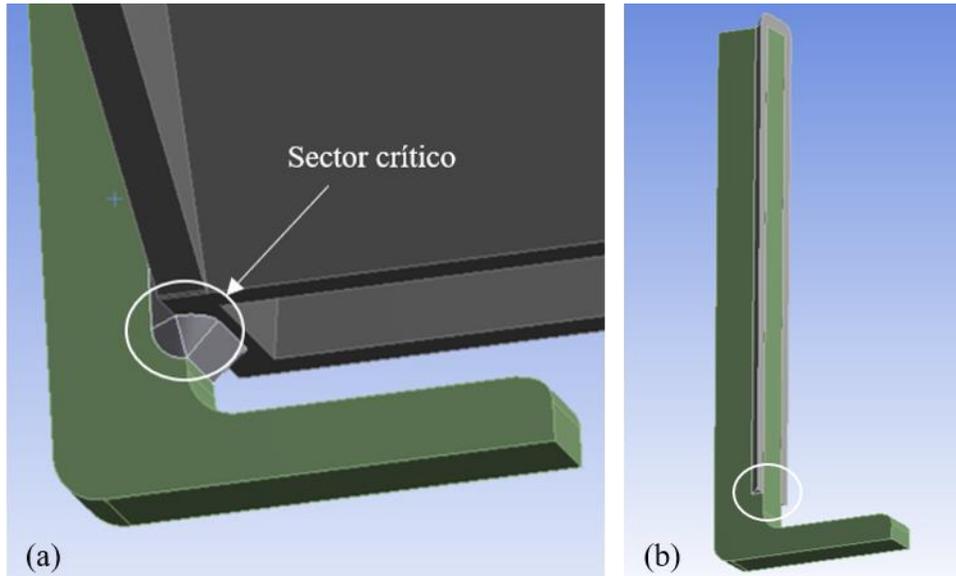


Figura 7.26: (a) Detalle de unión de filetes de soldadura en la zona inferior. (b) Filetes de soldadura sin unir en zona inferior.

Lo anterior debido a que cuando no se considera la unión de los filetes de soldadura (Figura 7.26.b), se produce una tensión máxima de Von Mises (en la soldadura) mayor a la admisible. Específicamente, a partir de la Figura 7.27 se tiene que la tensión de Von Mises máxima se produce en el sector inferior de los filetes de soldadura, con una magnitud de 371.12 [MPa], mientras que la tensión admisible es de 217.4 [MPa].

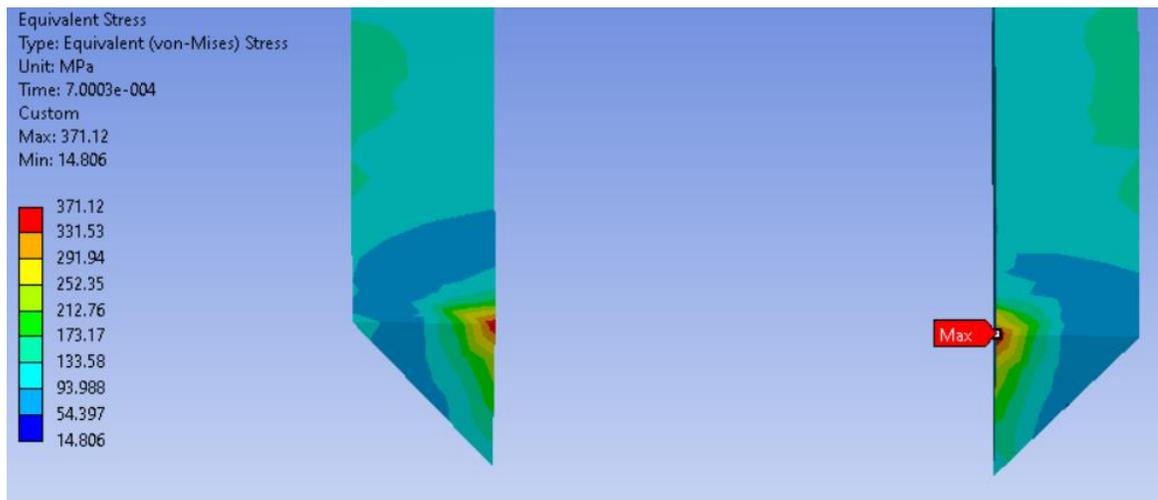


Figura 7.27: Detalle máxima tensión de Von Mises en soldadura sin considerar unión de filetes de soldadura.

7.8.2. Desplazamientos

A continuación, se muestra el desplazamiento del bogie y del sistema de anclaje, según el análisis ejecutado en el software ANSYS. En particular, la Figura 7.28 detalla el desplazamiento de los elementos en el eje transversal, mientras que la Figura 7.29 detalla el desplazamiento de los elementos en el eje vertical.

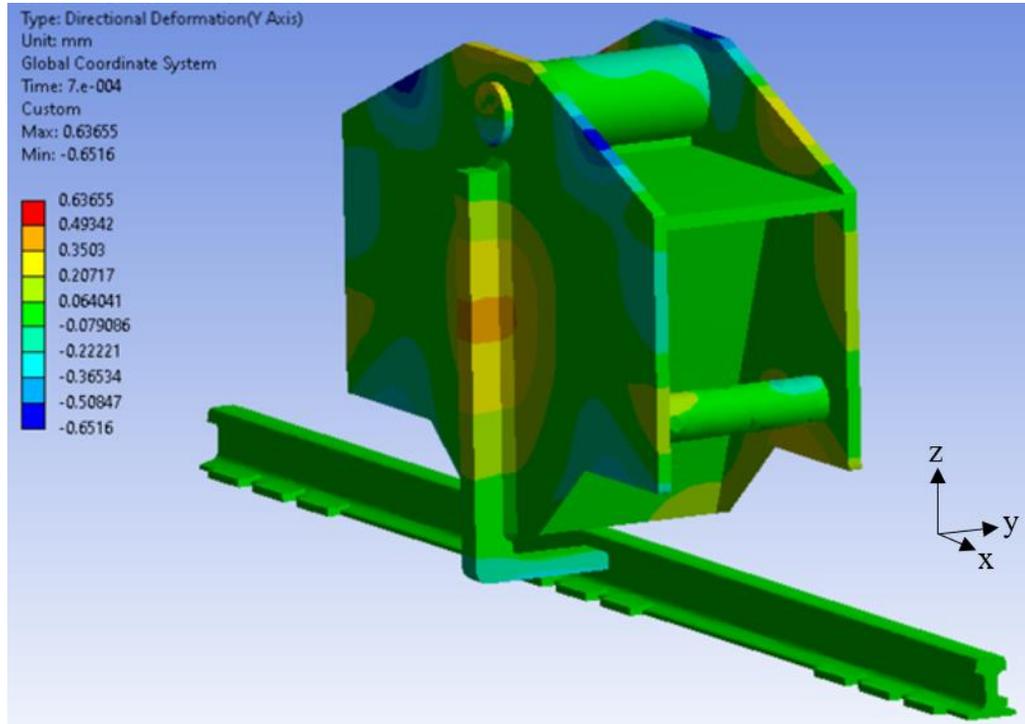


Figura 7.28: Desplazamiento de los elementos en el eje transversal.

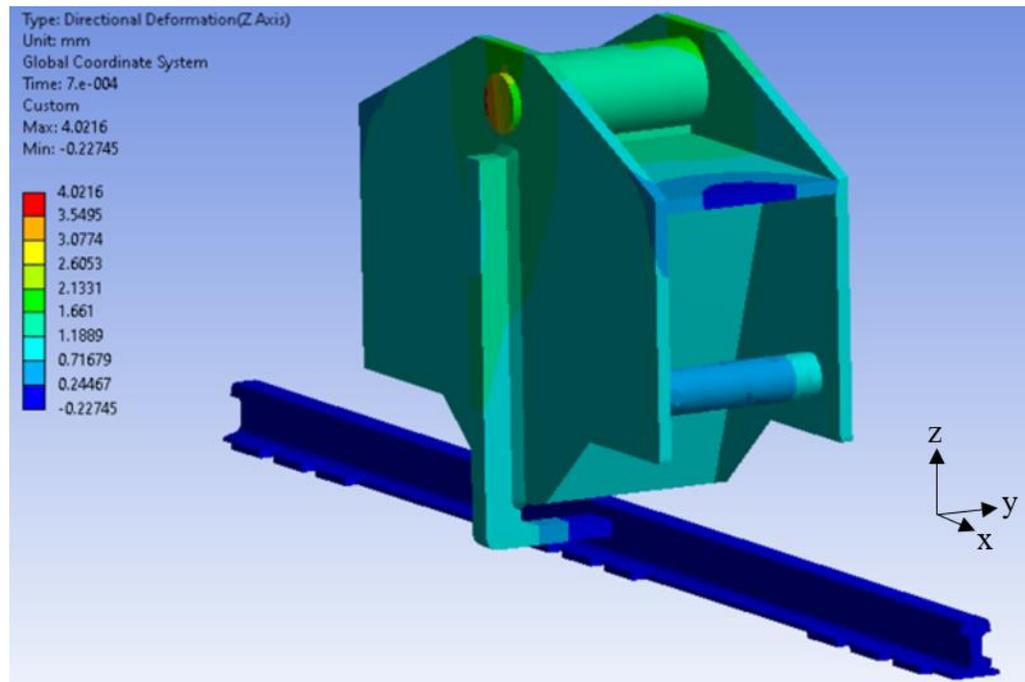


Figura 7.29: Desplazamiento de los elementos en el eje vertical.

Se obtiene que los desplazamientos en el eje transversal se concentran en dos sectores. El primero corresponde al pasador y la parte superior del bogie, donde se producen mayores desplazamientos debido a que en esa zona se aplica la carga de diseño. El segundo sector corresponde a la zona céntrica del bogie, la cual se desplaza debido a que en ese sector no se consideró ningún elemento que rigidice el bogie. Por lo tanto, la plancha principal del bogie es propensa a sufrir mayores desplazamientos en la zona céntrica, que en las zonas que poseen atiesadores.

Por otra parte, los resultados de desplazamientos verticales indican que las zonas más cercanas al pasador tienen mayores desplazamientos, debido a que esa es la zona de aplicación de la carga de diseño. El máximo desplazamiento vertical obtenido es de 4 mm aproximadamente en el pasador, mientras que en el bogie es de 2.4 mm. Adicionalmente, se debe considerar la holgura entre el anclaje y el riel que es de 10 mm.

Teniendo en cuenta que las pestañas que poseen las ruedas de los bogies son de 1 pulgada (25.4 mm) aproximadamente, el desplazamiento vertical del bogie no produce un levantamiento excesivo que implique el descarrilamiento de la grúa STS.

En la Figura 7.30 se presenta el detalle del desplazamiento transversal y vertical del elemento de anclaje. Estos resultados están relacionados con el comportamiento del bogie, se tiene que se producen mayores desplazamientos transversales en la zona central del anclaje, mientras que los mayores desplazamientos verticales en el anclaje se producen en la zona superior de este. Notar que en la zona de contacto entre el anclaje y el riel los desplazamientos son mínimos.

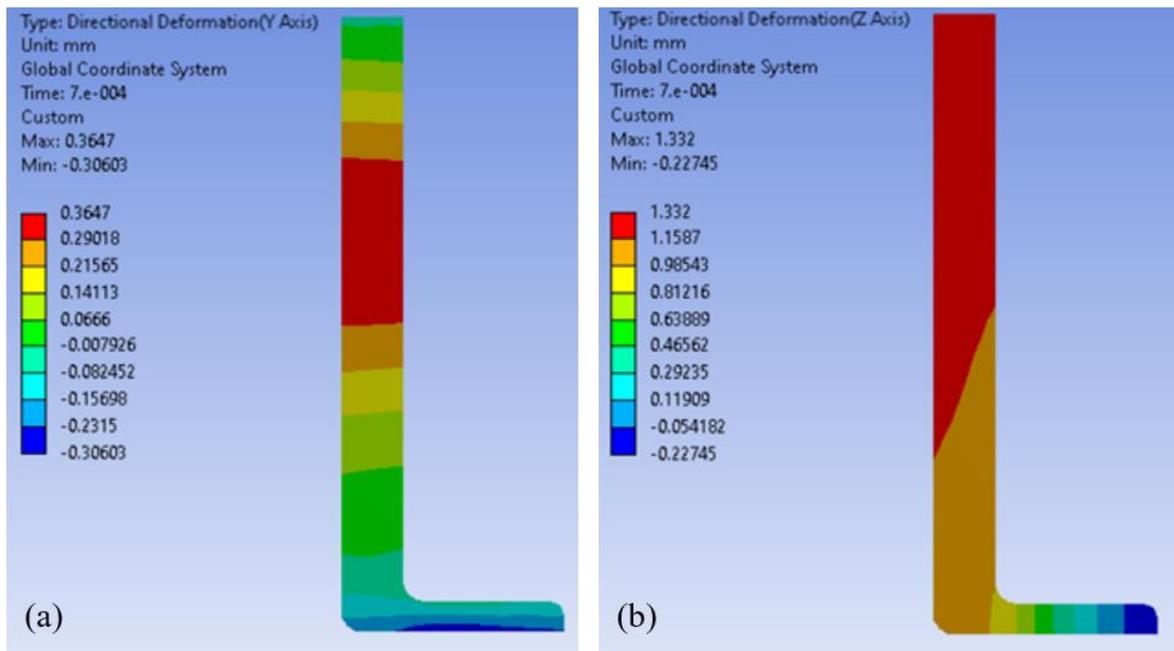


Figura 7.30: (a): Desplazamiento transversal del anclaje. (b) Desplazamiento vertical del anclaje.

7.8.3. Concentración de tensiones en el bogie

Los resultados obtenidos de tensiones de Von Mises en el conjunto de elementos modelados indican que se produce una concentración de tensiones cercano al sector de aplicación de la carga de diseño. La Figura 7.31 indica que la concentración se sitúa en el sector superior del contacto entre el bogie y el eje – pasador.

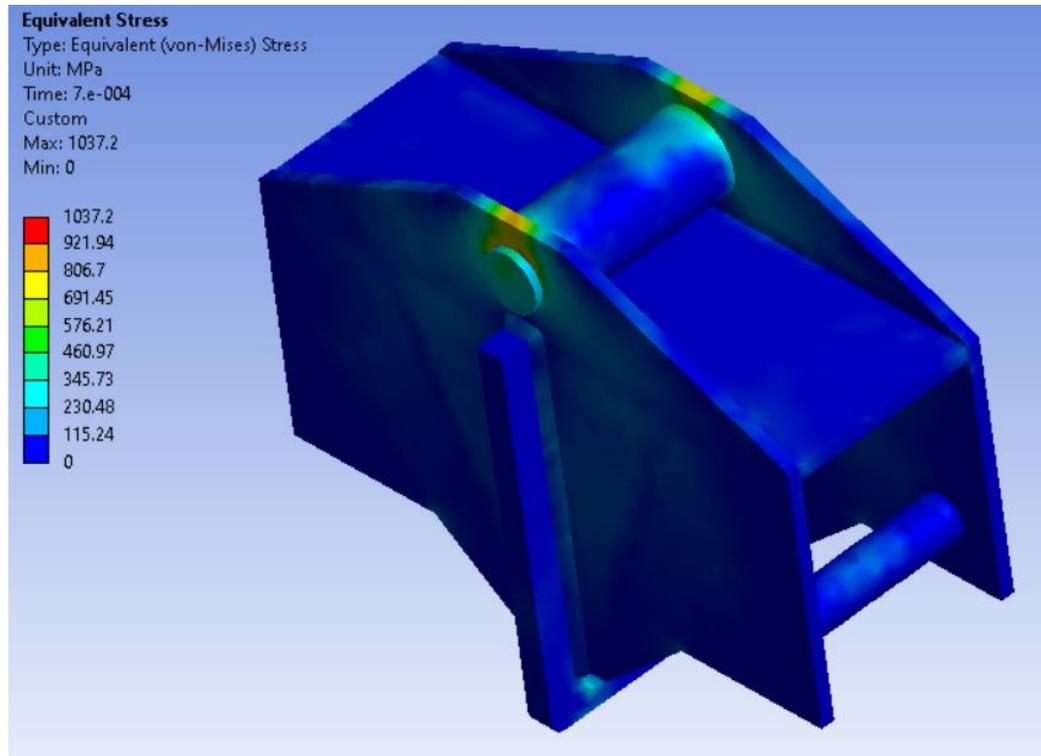


Figura 7.31: Concentración de tensiones en sector de aplicación de la carga de diseño (Caso carga aplicada en varios puntos).

Si se realiza una comparación entre distintas formas de aplicación de la carga de diseño, se tiene que cuando se distribuye la carga de diseño en varios puntos de aplicación (Figura 7.31), el valor de la tensión máxima es menor que cuando se aplica la carga de diseño de manera puntual (Figura 7.32). En el caso del análisis que se lleva a cabo en este trabajo de título, la carga de diseño se debe aplicar de manera distribuida, debido a que la fuerza de levante es aplicada en el pasador, y este actúa de manera uniforme sobre el bogie.

Por otra parte, se tiene que la modelación de ese sector del bogie se realizó a partir de planos de una grúa STS “tipo”, los cuales no tienen visibles elementos que permitan disminuir dicha concentración.

La magnitud de la tensión obtenida en el sector de concentración de tensiones sugiere que, tanto en proyectos nuevos como en muelles en operación que incorporen el sistema de anclaje, se debe tener en consideración por parte del proveedor de las grúas STS que el sector del pasador – eje del bogie debe contener elementos de refuerzo que eviten la falla del equipo móvil.

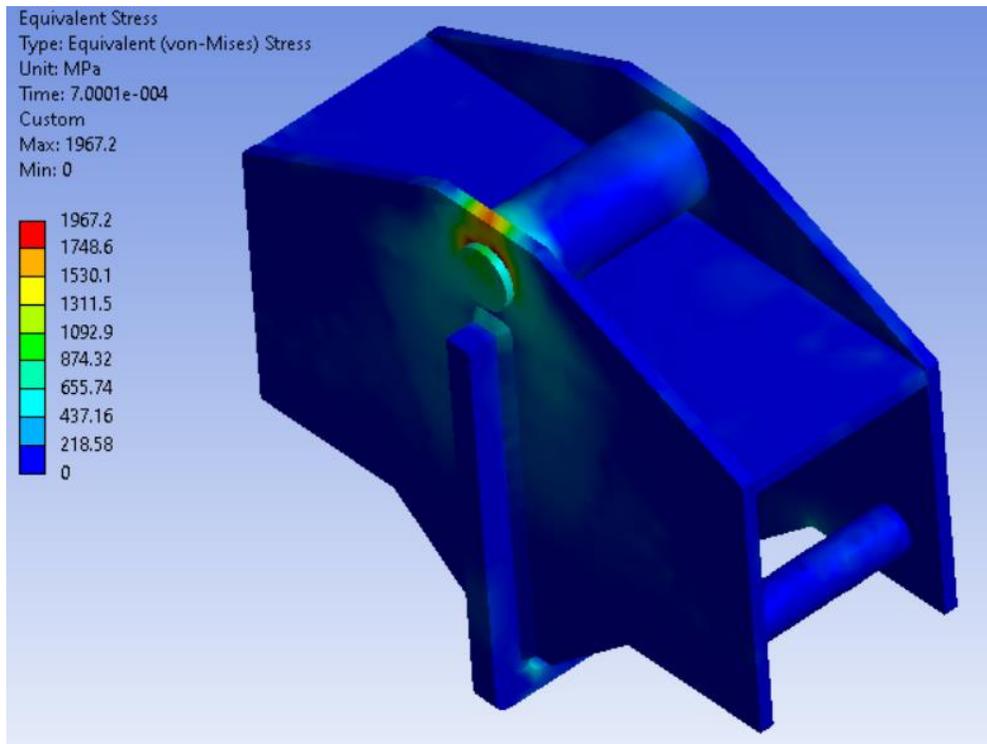


Figura 7.32: Concentración de tensiones en sector de aplicación de la carga de diseño (Caso carga puntual).

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones generales

Las grúas móviles STS (Ship to Shore) son el equipo principal de la carga y descarga de naves portacontenedores, a las cuales el diseño del sistema muelle – grúa debe garantizar la continuidad operacional establecida por la norma sísmica industrial. La operación de estos equipos móviles se realiza mediante un operador en cabina localizado en el brazo “boom” de la grúa, ubicado a unos 50 metros de altura.

Una de las fallas asociadas a las grúas STS es el descarrilamiento de las ruedas – bogies sobre el tablero de operación. Un caso de esta falla ocurrió el año 2010 en San Antonio, Chile, donde una grúa que operaba en el frente de atraque T1, EPSA, sufrió el descarrilamiento de ruedas lado tierra (Figura 8.1.a y Figura 8.1.b). Una falla más grave ocurrió en septiembre de 2018 en Palu, Indonesia, donde una grúa STS se descarriló y colapsó durante un terremoto de magnitud Mw 7.5 (Figura 8.1.c). Las consecuencias de la falla por descarrilamiento de estos equipos móviles pueden ser cortas paralizaciones para reacomodar las ruedas descarriladas. Sin embargo el caso de descarrilamiento y colapso de la grúa, significa gran impacto operacional con largas paralizaciones. Además, se pone en riesgo la vida del operador en la cabina, se pone en riesgo a los buques atracados, entre otros.



Figura 8.1: (a) y (b) Descarrilamiento en San Antonio, Chile, 2010. (c) Colapso grúa STS en Palu, Indonesia, 2018.

Existen estudios del comportamiento sísmico de las grúas STS en muelles transparentes, donde se han elaborado modelos físicos a escala sobre mesa vibratoria, los que han sido solicitados con registros de aceleraciones de distintos terremotos. Determinar con exactitud la magnitud del levantamiento y desplazamiento transversal de las ruedas – bogies de las grúas STS es complejo. Sin embargo, los estudios confirman la existencia de secuencias de levantamiento de los bogies que conducen al descarrilamiento de todas las ruedas de las grúas STS.

La normativa sísmica industrial nacional aborda los problemas de inestabilidades y levantamientos de los grandes equipos móviles en diversas disposiciones de la norma NCh2369 actualizada. En primer lugar, de manera general indica en su disposición 15.6.1 que “los grandes equipos móviles se deben analizar dinámicamente. Para el análisis se puede suponer que las ruedas o carros de ruedas están articuladas en los rieles o en la infraestructura de soporte, pero si hay levantamientos que pueda provocar el total descarrilamiento de las ruedas, se deben colocar contrapesos y/o anclajes o sistemas de aislación sísmica para evitarlos”.

Adicionalmente, de manera específica para garantizar la estabilidad de las grúas utilizadas en proyectos marítimo – portuarios, la disposición 13.16 establece que “deben realizarse estudios específicos tendientes a evaluar la estabilidad de las grúas u otros equipos importantes y que, en ausencia de un análisis de desempeño estructural del muelle (de tipo tiempo historia no lineal), se acepta como indicador de estabilidad suficiente el que no se produzcan tracciones netas en los apoyos de los equipos”. La norma NCh2369 actualizada establece que no debe aceptarse el descarrilamiento total de equipos y que, cuando no es posible garantizar lo anterior, se deben implementar mejoras, como por ejemplo el uso de anclajes del equipo contra el tablero o subestructura.

En este sentido, los proyectos portuarios nuevos deben incorporar en su diseño sísmico la utilización de anclajes para evitar el levantamiento de las ruedas de las grúas STS, mientras que los actuales muelles en operación deben implementar medidas correctivas que aseguren el total cumplimiento de la norma NCh2369.

En la práctica industrial chilena, equipos mineros han sido diseñados cumpliendo los requisitos expuestos por la norma NCh2369. Sin embargo, en la industria portuaria, en particular en el caso de las grúas STS, no se ha hecho cumplimiento de estas exigencias, lo cual debiera corregirse.

8.2. Conclusiones de análisis sísmicos

Para obtener el comportamiento sísmico de las grúas STS se han llevado a cabo análisis de tipo modal – espectral y tiempo – historia no lineal. El análisis modal – espectral se realizó para la demanda sísmica establecida por el espectro elástico de la norma NCh2369 debido a que “el levantamiento de uno de apoyos de los equipos corresponde a un tipo de falla que no presenta ningún tipo de ductilidad o sobre-resistencia asociada. Por este motivo un análisis sísmico del conjunto en base a cargas reducidas carece de sentido físico para este fin” (Instituto Nacional de Normalización, 2017).

El cálculo de fuerzas en los elementos de conexión de las grúas STS con el tablero, ejecutado mediante el análisis modal espectral se realiza como verificación preliminar. Los resultados de fuerzas de tracción en los elementos de conexión implican que se deben implementar medidas para evitar el levantamiento de los puntos de apoyo de las grúas STS, entendiendo el levantamiento como la ocurrencia de tracciones verticales.

Por otra parte, los análisis tiempo – historia no lineal permiten describir el movimiento del punto superior de la conexión entre la grúa STS y el tablero (sin anclajes) y determinar las fuerzas máximas que se producen en la conexión grúa – tablero (con anclajes). En este trabajo se plantea que sólo se restrinja el levantamiento en los bogies lado mar, mientras que se permita el libre levantamiento de los bogies lado tierra. De esta manera, se libera energía por medio de desplazamientos, disminuyendo las solicitaciones en las estructuras.

El modelo utilizado considera los apoyos lado mar como elementos rígidos (anclajes), cumpliendo la norma NCh2369, que específicamente en su Capítulo 13 indica que “se deben utilizar modelos integrados que permitan evaluar el desempeño de topes sísmicos, anclajes u otro elemento cuyo fin sea entregar estabilidad ante eventos sísmicos”, se incorporan anclajes en el lado mar para evitar el total descarrilamiento de la grúa STS.

Para ejecutar los análisis tiempo – historia se hizo cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Capítulo 5.8 – Análisis especiales de la norma NCh2369 actualizada. En particular, se seleccionaron componentes horizontales y verticales de registros de aceleración de tres eventos sísmicos: Constitución 2010, Matanzas 2010 y Llolleo 1985. La uniformidad en la intensidad de los registros de aceleración se logra mediante la modificación de los registros sísmicos, de manera que los espectros de pseudo-aceleración sean mayores al espectro de referencia (espectro elástico definido por NCh2745).

A partir de la Figura 8.2, se puede comparar el espectro elástico definido por la norma NCh2369, el espectro de referencia (espectro elástico de NCh2745) y los espectros obtenidos de los registros de aceleración de Constitución, Matanzas y Llolleo (sin amplificar). Se observa que el espectro elástico NCh2369 posee aceleraciones menores a las producidas en los tres casos estudiados, mientras que el espectro de referencia es más exigente. Por lo tanto, el espectro de referencia (espectro elástico de NCh2745) dispuesto por la norma NCh2369 actualizada en su artículo 5.8.2, corresponde a un parámetro razonable de demanda sísmica para ejecutar análisis de respuesta en el tiempo.

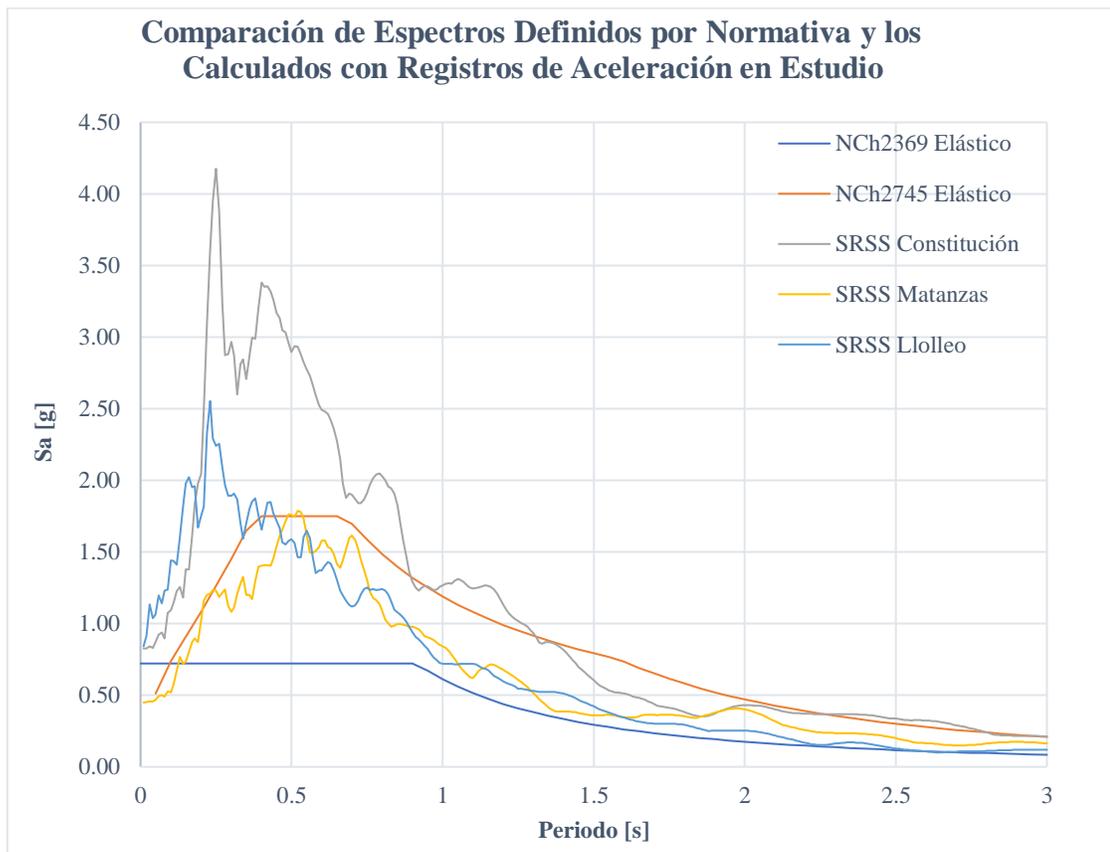


Figura 8.2: Comparación de espectro definidos por normativa y calculados con registros de aceleración en estudio.

8.3. Conclusiones del elemento de fijación anti – levante

La carga de diseño del elemento de fijación anti – levante está determinada a partir de los resultados obtenidos de los análisis tiempo – historia no lineal. En particular, la carga corresponde a la tracción máxima en el elemento rígido (con anclaje) de conexión entre la grúa STS y el tablero. Esta carga se ha modificado teniendo en cuenta consideraciones de diseño debido a la acción simultánea de los anclajes, el método de diseño utilizado (LRFD), el factor de impacto debido a la holgura entre el anclaje y el riel y un factor de seguridad debido a las incertidumbres existentes en el proceso de diseño y modelación.

Como criterio de diseño se ha considerado que, de los ocho anclajes que se incorporan a cada bogie, sólo cuatro de estos actuarán simultáneamente. Se está proveyendo un factor de seguridad (Ω) 2, que toma en cuenta que el bogie es un sistema articulado y no es posible asegurar que en el instante que el sismo levanta al bogie con sus ocho ruedas, los ocho anclajes trabajarán simultáneamente.

Lo que se busca al utilizar este criterio es que el elemento diseñado se mantenga en régimen elástico. Por otra parte, establecer un criterio como el descrito previamente permite cumplir uno de los principios básicos establecidos por la norma NCh2369, que tiene que ver con la redundancia en los sistemas sismorresistentes.

Se busca que las estructuras tengan reservas de resistencia y/o sean capaces de absorber grandes cantidades de energía, más allá del límite elástico, para evitar el colapso y/o falla para sismos más severos que el sismo de diseño definido por la normativa sísmica industrial. Cumpliendo lo anterior, se protege la vida de los operadores y se garantiza la continuidad operacional en la industria.

8.4. Recomendaciones

8.4.1. Modificaciones al proyecto de norma NCh2369

El presente trabajo ha sido realizado cumpliendo los requisitos establecidos en el proyecto de norma NCh2369, actualmente en discusión. El documento final publicado por INN podría tener cambios, los cuales afectarían los alcances, cálculos y resultados de los análisis sísmicos realizados. Sin embargo, la metodología planteada y ejecutada en el presente estudio sigue siendo válida.

Un aspecto en particular dice relación con el espectro de referencia utilizado en los análisis tiempo – historia no lineal, el cual corresponde al espectro elástico definido en la norma NCh2745. Es probable que se establezca otro espectro como referencia para la ejecución de análisis especiales y para el cálculo de deformaciones. No obstante, el espectro utilizado en el trabajo corresponde a uno conservador, por lo que en caso de establecerse un nuevo espectro de referencia, los resultados obtenidos a partir de este serían menores a los presentados en este trabajo.

El espectro de referencia se encuentra actualmente en discusión en el comité de norma NCh2369. Según avances a la fecha, el nuevo espectro de referencia para la ejecución de análisis especiales y para el cálculo de deformaciones generaría solicitaciones sísmicas que serían un 30% menores aproximadamente a las generadas por el espectro elástico de NCh2745.

8.4.2. Canaleta

En puertos de contenedores en los que operan grúas STS, a nivel de tablero existe una canaleta que permite la instalación de los rieles. La disposición de la canaleta y sus dimensiones no deben interferir con el tránsito de equipos y vehículos sobre el tablero del muelle. La instalación del anclaje diseñado en el presente trabajo requiere de un ancho de canaleta superior al usado actualmente en los muelles de contenedores. En caso de disponerse una canaleta para la operación de la grúa con anclaje, se generarían problemas de tránsito de equipos principalmente en el riel lado tierra, debido a que en este sector se realiza necesariamente el tránsito de vehículos y equipos.

En el presente trabajo se está proponiendo sólo disponer anclajes móviles en el riel lado mar de la grúa STS, por lo tanto la solución de anclajes móviles propuesta no generan a la operación portuaria y tránsito de equipos sobre el tablero del muelle, ninguna interferencia.

La norma NCh2369 actualizada, específicamente en su Capítulo 13, establece que no debe aceptarse el descarrilamiento total de los equipos (todos los apoyos), sin embargo, puede aceptarse el descarrilamiento parcial de un equipo móvil. En el presente estudio se plantea restringir el levantamiento de los bogies lado mar, permitiendo el libre levantamiento de los bogies lado tierra. Por lo tanto, las modificaciones en la canaleta del tablero afectan sólo al sector lado mar, no interfiriendo el tránsito de vehículos sobre el tablero de operación.

En el caso de que se quiera restringir el levantamiento de los bogies lado mar y lado tierra, el diseño del anclaje puede ser optimizable, permitiendo un ancho menor de canaleta que no genere problemas en la circulación de vehículos y equipos sobre el tablero del muelle.

En proyectos actualmente en operación que incorporen la solución del anclaje vertical móvil, se deberán ejecutar trabajos de demolición local del tablero de hormigón, y la instalación de nuevas armaduras de refuerzo y hormigonado para lograr la geometría de canaleta necesaria que permita

la instalación del anclaje móvil de la grúa. En proyectos nuevos de muelles, desde el inicio se incorporará la canaleta en el lado mar con el ancho establecido por el diseñador.

8.4.3. Unión entre anclaje y bogie

La solución planteada en este trabajo considera una unión soldada entre el elemento de anclaje y el bogie, solución que puede ser adoptada por proyectos actualmente en operación que posean geometrías y disponibilidad de espacio en el bogie como las expuestas en los planos proporcionados por la empresa Liebherr.

Otro tipo de unión entre el anclaje y el bogie es mediante el uso de pernos (Figura 8.3). Estos permiten que la instalación, inspección y cambio del anclaje se realice de forma más fácil, sin mayores intervenciones a los bogies de las grúas STS. En proyectos nuevos, se recomienda que la incorporación del anclaje considere uniones apernadas entre el anclaje y el bogie.

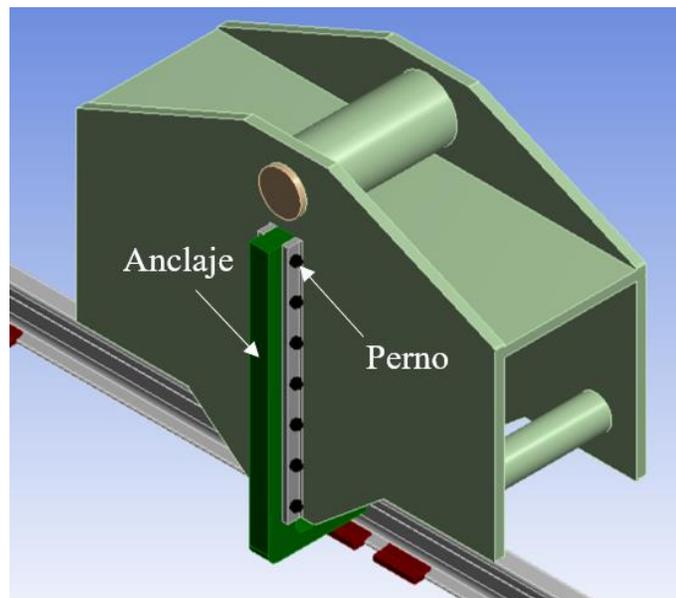


Figura 8.3: Esquema de unión apernada entre anclaje y bogie.

Adicionalmente, se recomienda que en cada proyecto portuario en el cual se incorporen anclajes que eviten el levantamiento de las ruedas de las grúas, se establezcan revisiones al sistema de anclaje luego de ocurrido un evento sísmico de mediana intensidad. Los elementos a inspeccionar deben ser los anclajes, la soldadura o pernos de unión, el riel, los clamps y los pernos de anclaje. Se recomienda que, al momento de la instalación de estos elementos, se consideren repuestos en bodega.

Debido a la importancia de conseguir un correcto comportamiento del sistema de anclaje vertical móvil frente a altas demandas sísmicas, se recomienda realizar estudios experimentales mediante ensayos para comparar y verificar los resultados.

8.4.4. Conexión entre rieles

Para conectar dos rieles adyacentes se deben utilizar métodos de soldadura de rieles para asegurar la no interferencia con el sistema de anclaje. Dos métodos recomendados de soldadura de rieles son: mediante soldadura de arco y mediante soldadura aluminotérmica (Figura 8.4).



Figura 8.4: (a) Soldadura de arco. (b) Soldadura aluminotérmica.

En la actualidad la mayor parte de los proyectos portuarios considera la unión de rieles adyacentes mediante soldadura. Sin embargo, si algún proyecto actualmente en operación posee sistema de unión de rieles adyacentes mediante eclisas (placa metálica plana que se usa para conectar dos rieles adyacentes mediante una serie de pernos de riel), estos deben modificar la unión por el sistema de soldaduras, debido a que no se debe interferir en el desplazamiento longitudinal de la grúa STS.

9. BIBLIOGRAFÍA

- American Institute of Steel Construction. (2016). *AISC 360-16: Specification for structural steel buildings*. Chicago, Estados Unidos.
- American Railway Engineering and Maintenance of way Association. (2009). *Manual for Railway Engineering*. Estados Unidos.
- American Welding Society. (2015). *Structural Welding Code - Steel*. Estados Unidos.
- Boroschek, R., Soto, P., & Leon, R. (2010). *Registros del Terremoto del Maule Mw=8.8*. RENADIC, Santiago, Chile.
- Directemar - Armada de Chile. (2019). *Boletín estadístico marítimo*. Valparaíso, Chile.
- Figuroa, F. (2017). *Estudio de evaluación de tipos de conexión sísmica viga-pilote de acero en muelles transparentes*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.
- Hand, B. (2014). *An analysis into wind induced loading effects on a STS crane and investigation into design optimisation*. Cork Institute of Technology, Department of Mechanical, Biomedical and Manufacturing Engineering, Cork, Irlanda.
- Instituto Chileno del Acero. (2001). *Libro de diseño para estructuras de acero*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh2369, *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1537, *Diseño estructural de edificios - Cargas permanentes y sobrecargas de uso*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2010). NCh3171, *Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de carga*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2013). NCh2745, *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2017). *Anteproyecto de Norma, Actualización NCh2369, Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. Santiago, Chile.
- Jacobs, L., DesRoches, R., & Leon, R. (2008). *Shake table testing of container cranes*. The 14^o world conference on earthquake engineering, Beijing, China.
- Kobayashi, N., Kuribara, H., Honda, T., & Watanabe, M. (2004). *Nonlinear Seismic Responses of Container Cranes Including the Contact Problem Between Wheels and Rails*. American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, Estados Unidos.
- Kosbab, B. (2010). *Seismic performance evaluation of port container cranes allowed to uplift*. Georgia Institute of Technology, Atlanta, Estados Unidos.
- Ministerio de Obras Públicas. (2013). *Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras*. Chile.

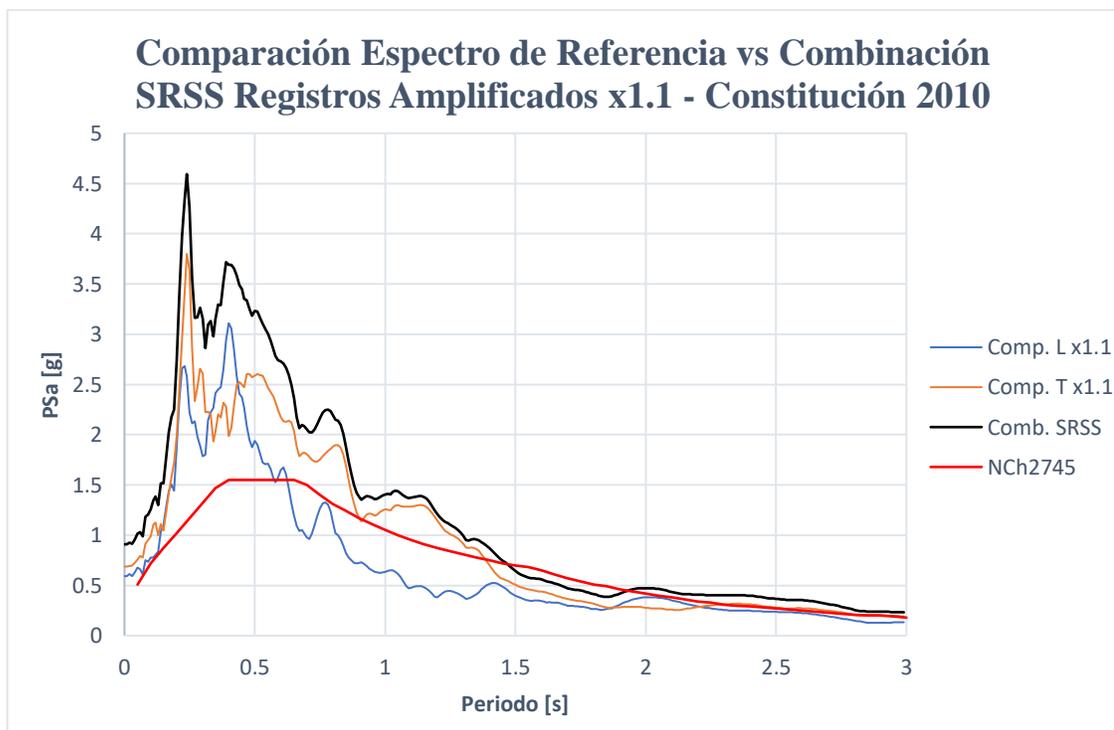
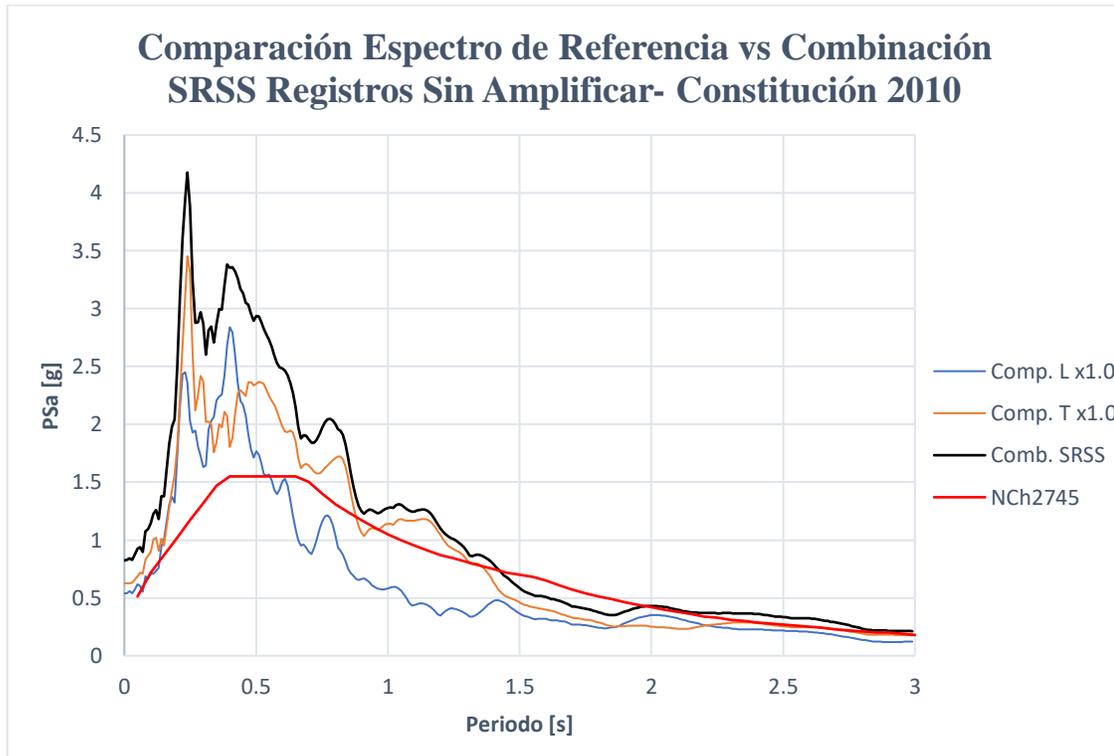
- Segui, W. (2013). *Steel design*. Mason, OH, Estados Unidos: Cengage learning.
- Torrano, S., & Herrero, D. (2011). Criterios de plasticidad y rotura. En *Apuntes de Elasticidad y Resistencia de Materiales*.
- UNCTAD. (2018). *Informe sobre el transporte marítimo 2018*. New York, Estados Unidos.
- Yamamoto, S., Sugano, T., Tanabe, T., Nakashima, S., Miyata, M., Etoh, T., . . . Tatsumi, Y. (2000). *A study of the interaction between the pier type wharf and container crane during earthquakes*. The 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Nueva Zelanda.
- Zapata Baglietto, L. (1997). *Diseño estructuras en acero*. Lima, Perú.

10. ANEXOS

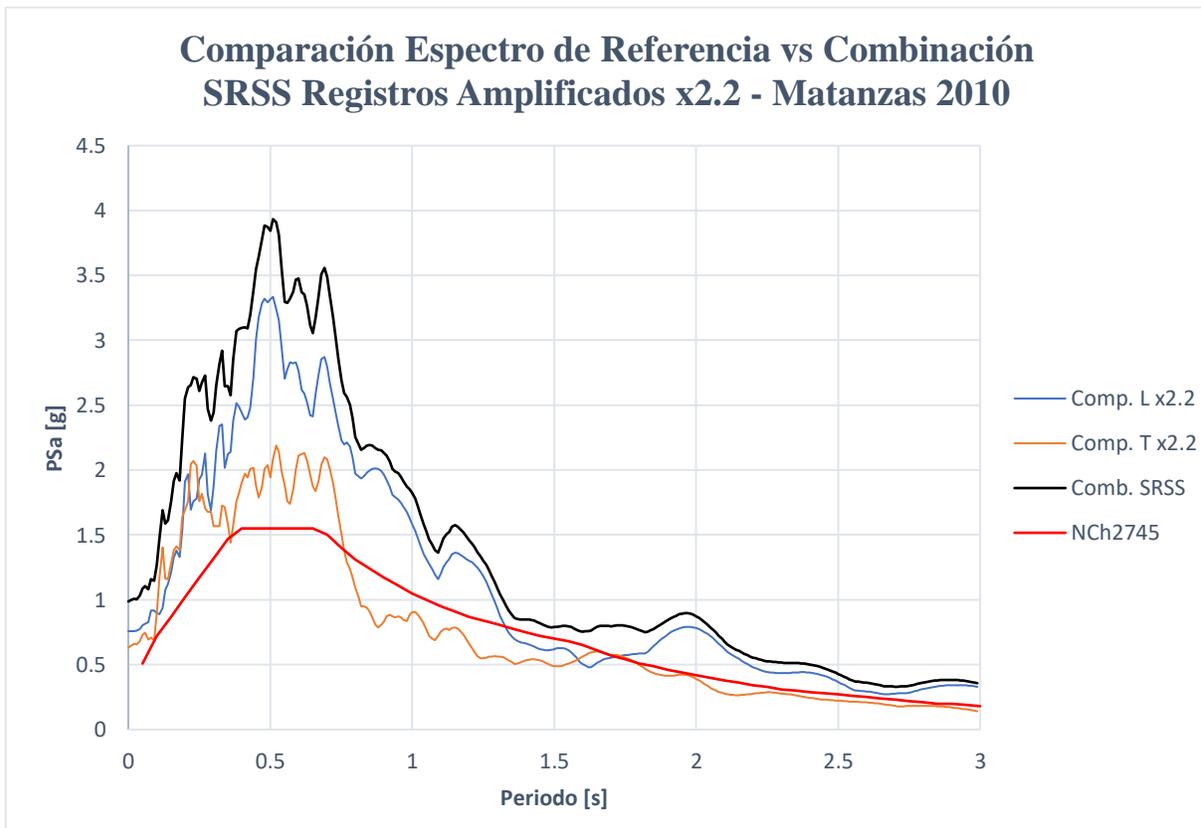
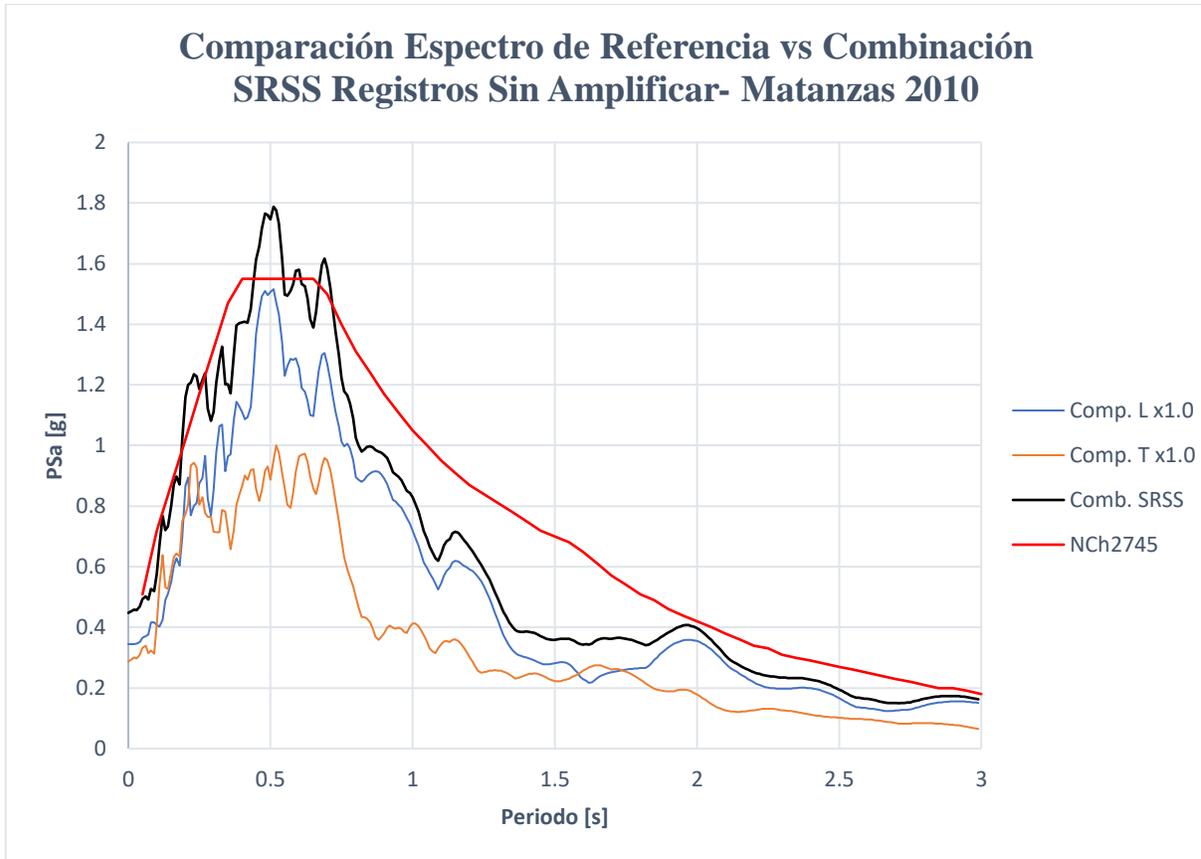
10.1. Anexo A: Espectros calculados y combinados con SRSS

Se presentan las combinaciones SRSS de los espectros de seudo – aceleración calculados a partir de los registros horizontales (sin y con amplificación) de cada evento, en comparación con el espectro de referencia (espectro elástico definido por NCh2745).

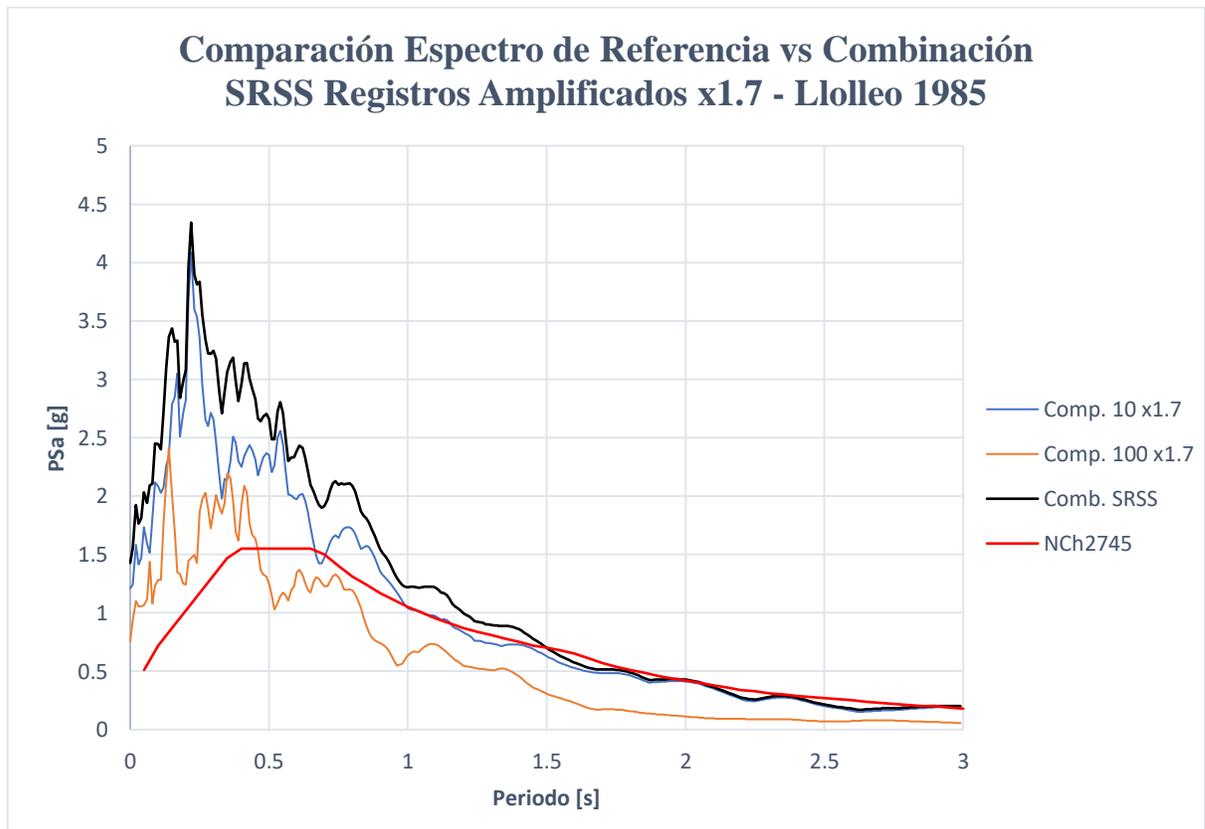
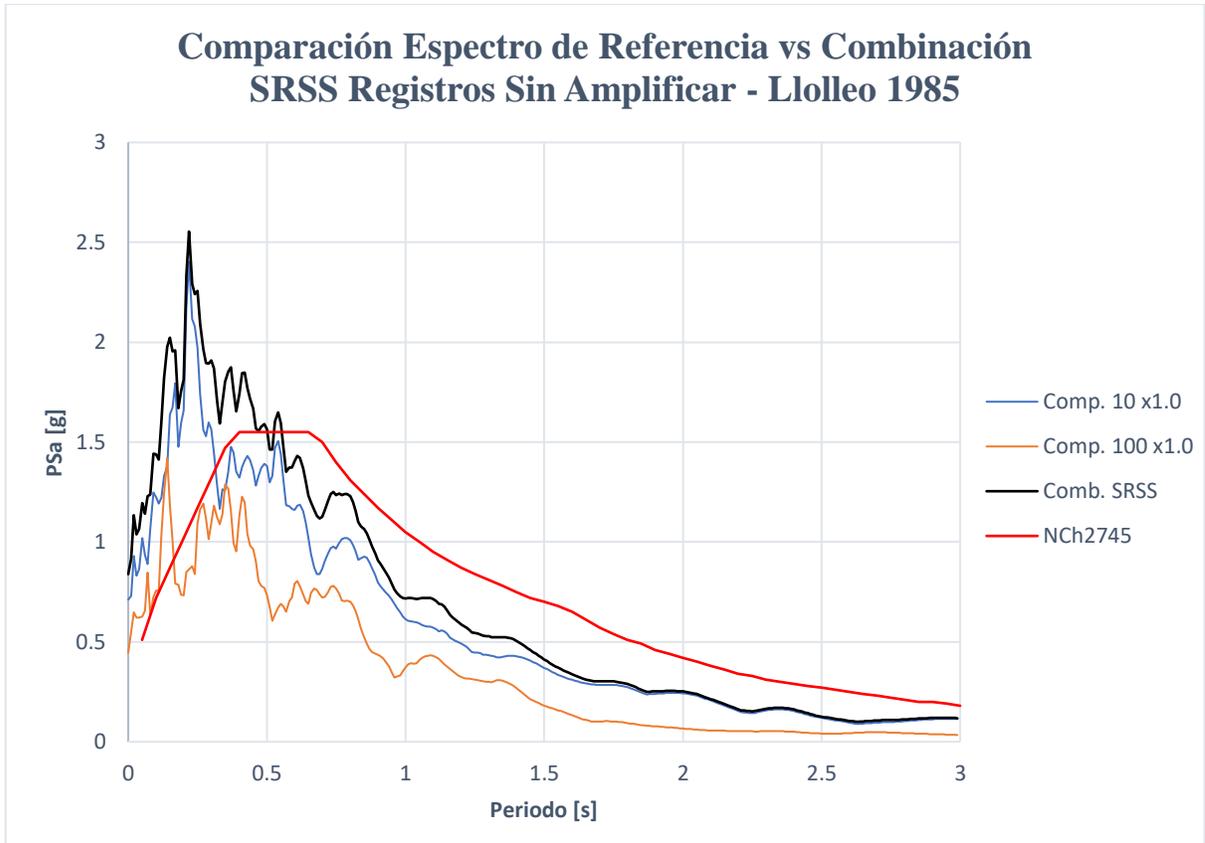
- Constitución 2010



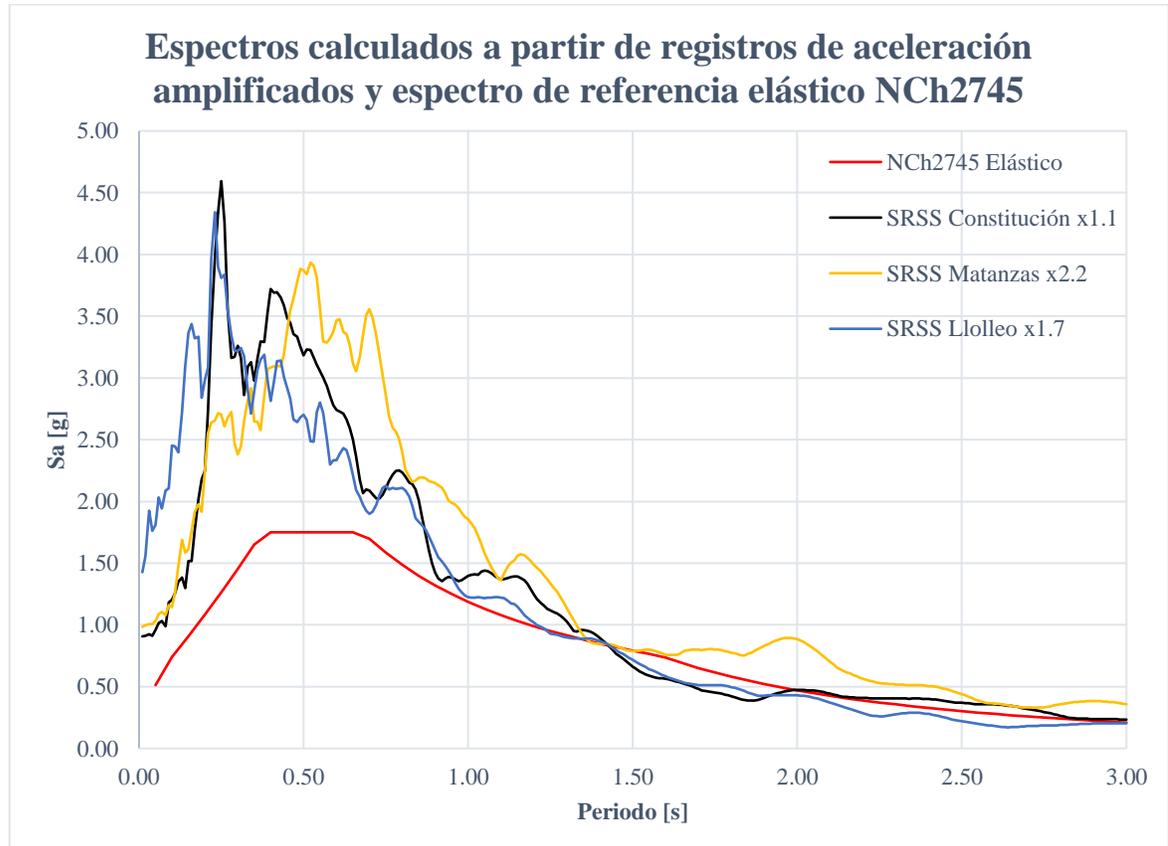
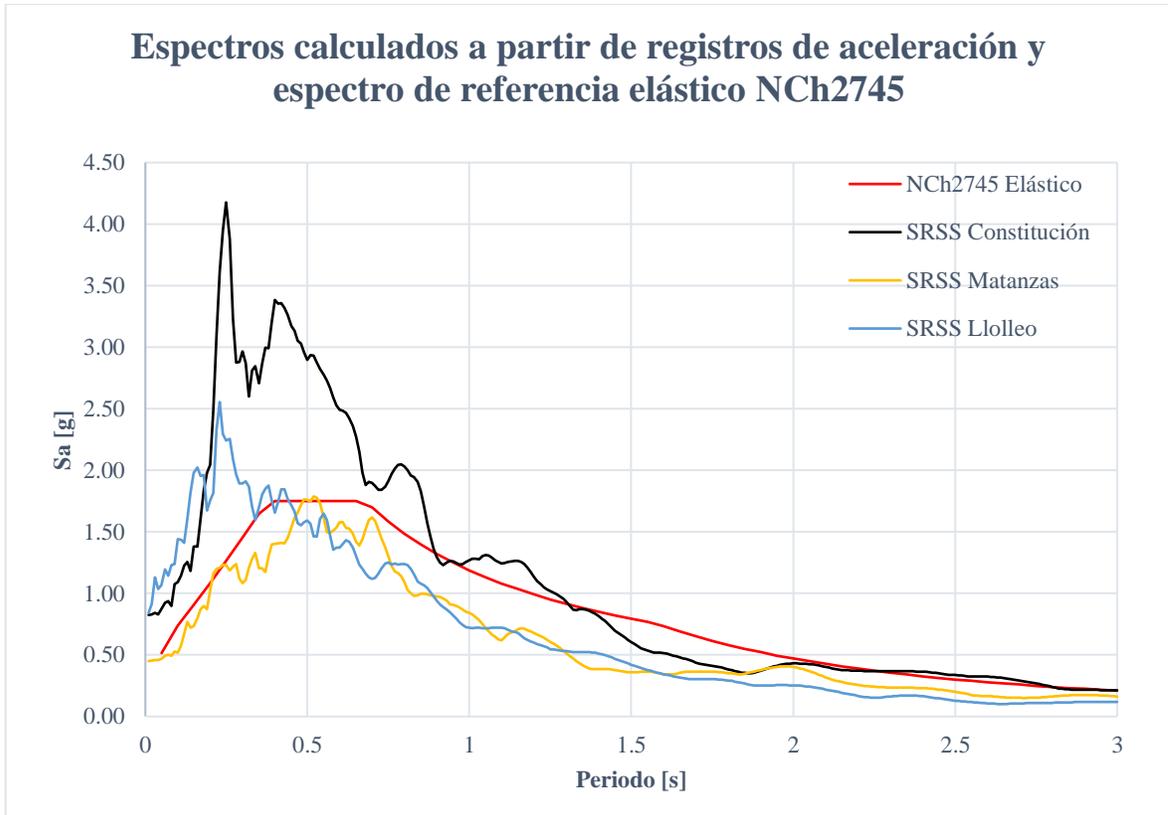
- Matanzas 2010

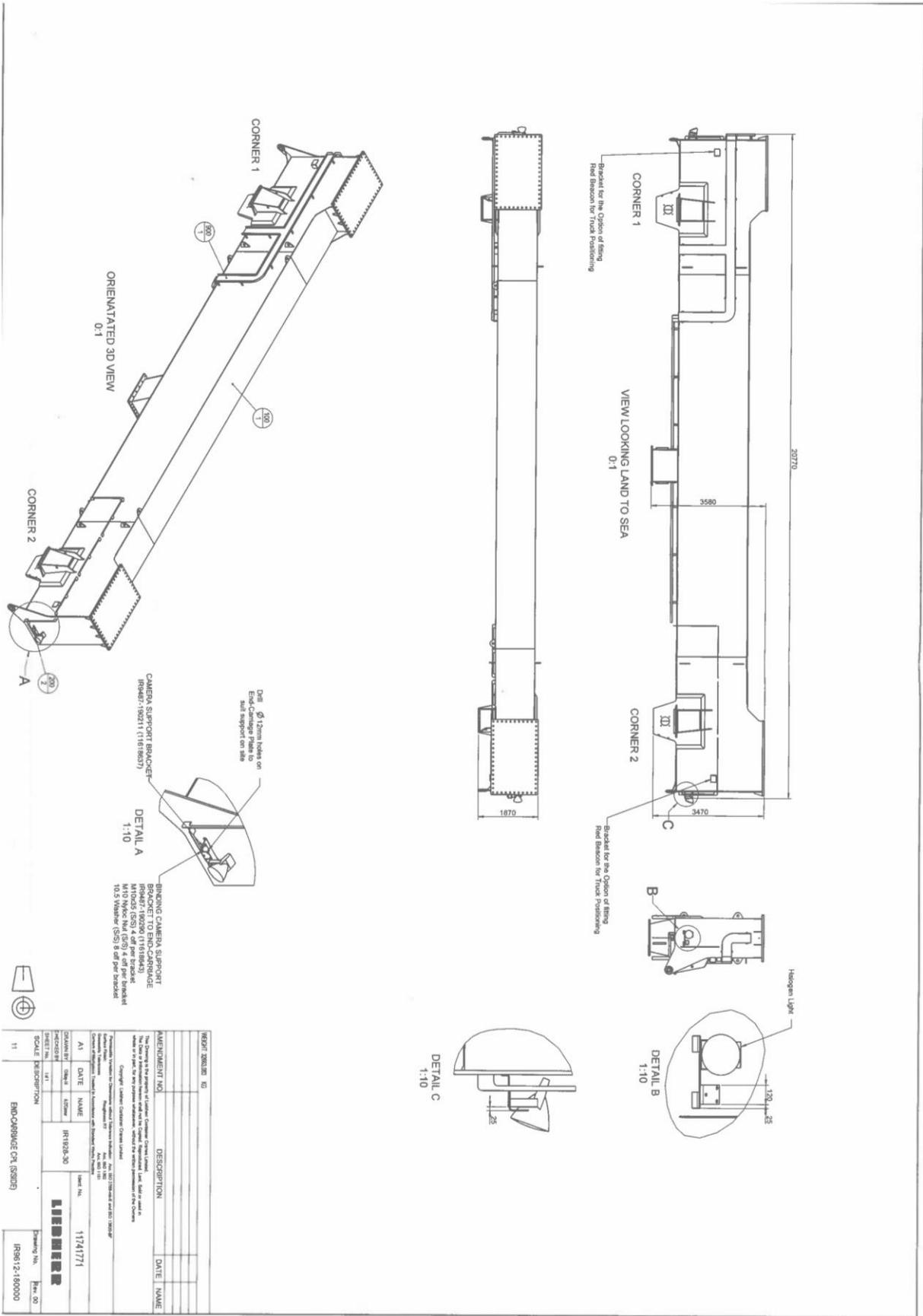


- **Llolleo 1985**



- **Resumen**





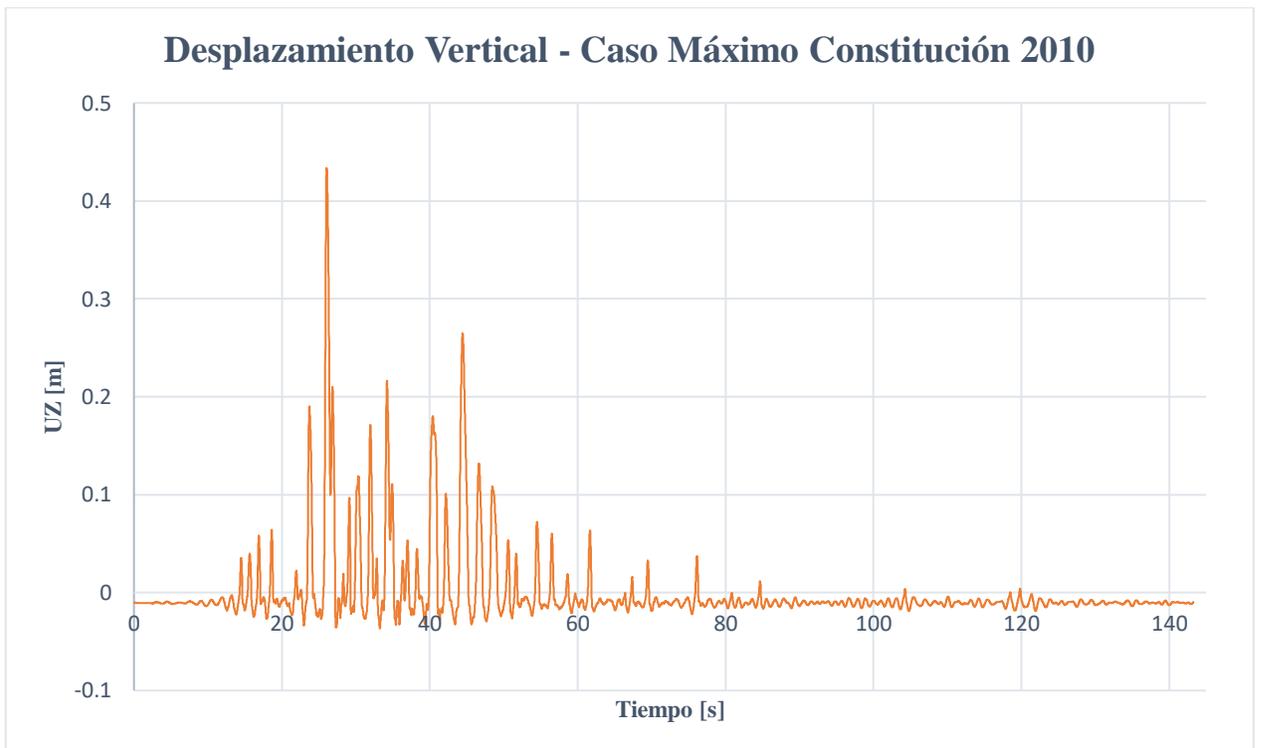
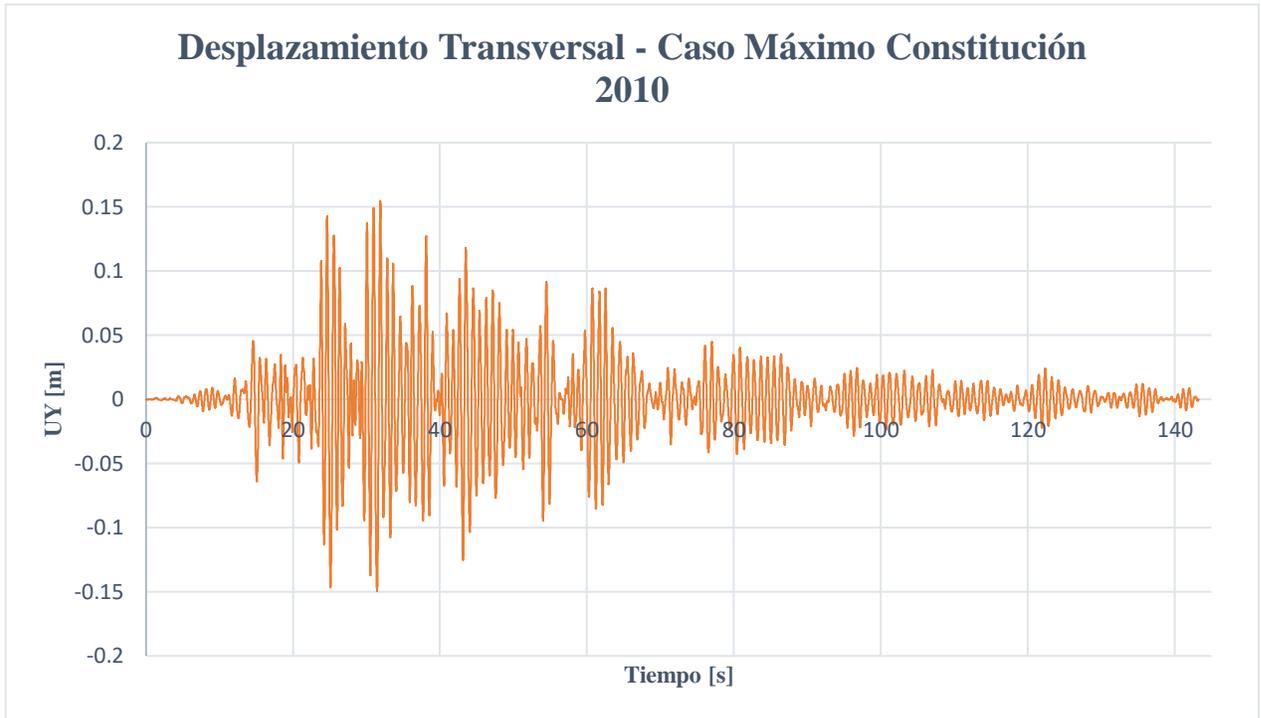
REPORT NUMBER	REV	DESCRIPTION	DATE	NAME
11		END-CARRIAGE FOR (S202)		

AMENDMENT NO.	DESCRIPTION	DATE	NAME
1	Initial design		
2	Revised design		
3	Final design		

AI	DATE	NAME	INITIALS
AI1	15/10/2020		
AI2	11/11/2020		

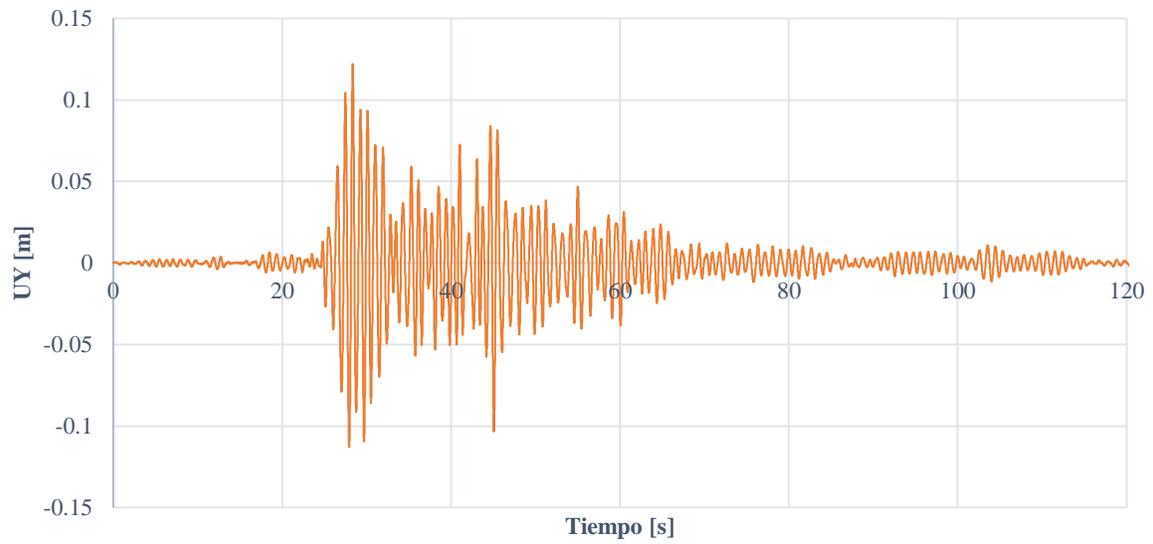
SCALE	DESCRIPTION	Drawing No.	Rev. No.
1:10	END-CARRIAGE FOR (S202)	IR9612-160000	00

10.3. Anexo C: Máximos desplazamientos obtenidos en los eventos sísmicos estudiados
- Constitución 2010

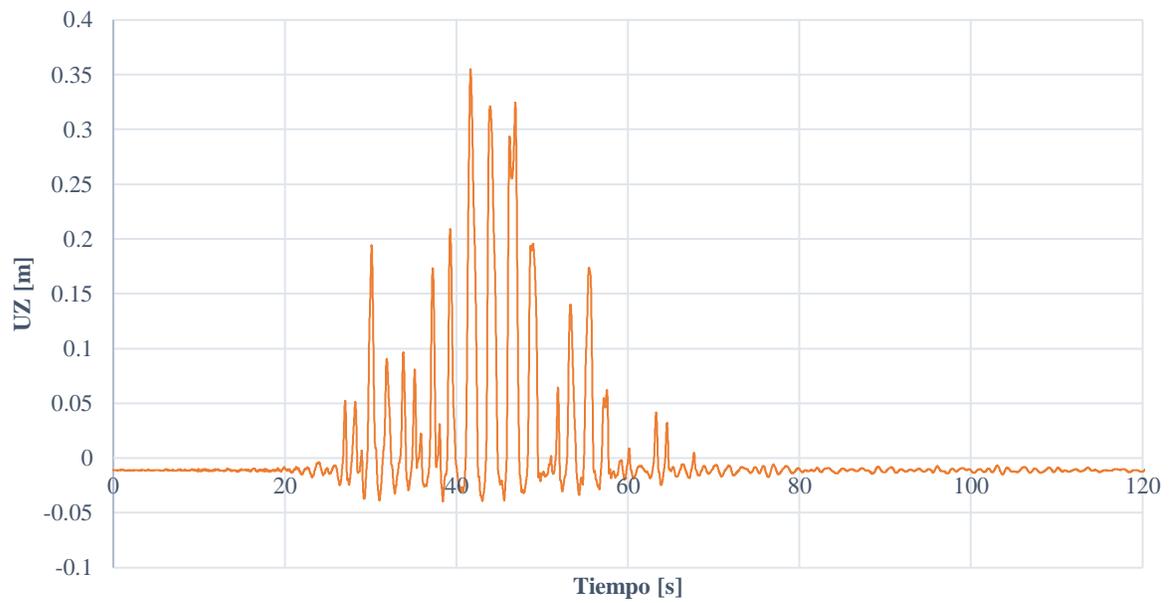


- **Matanzas 2010**

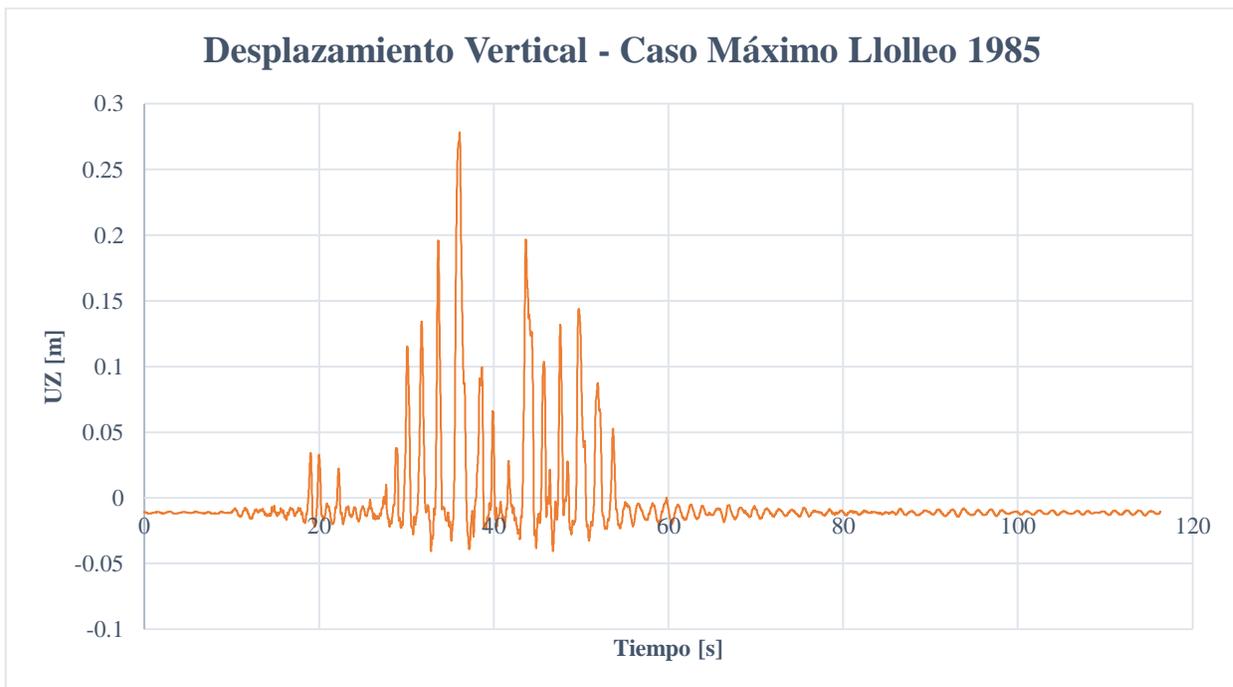
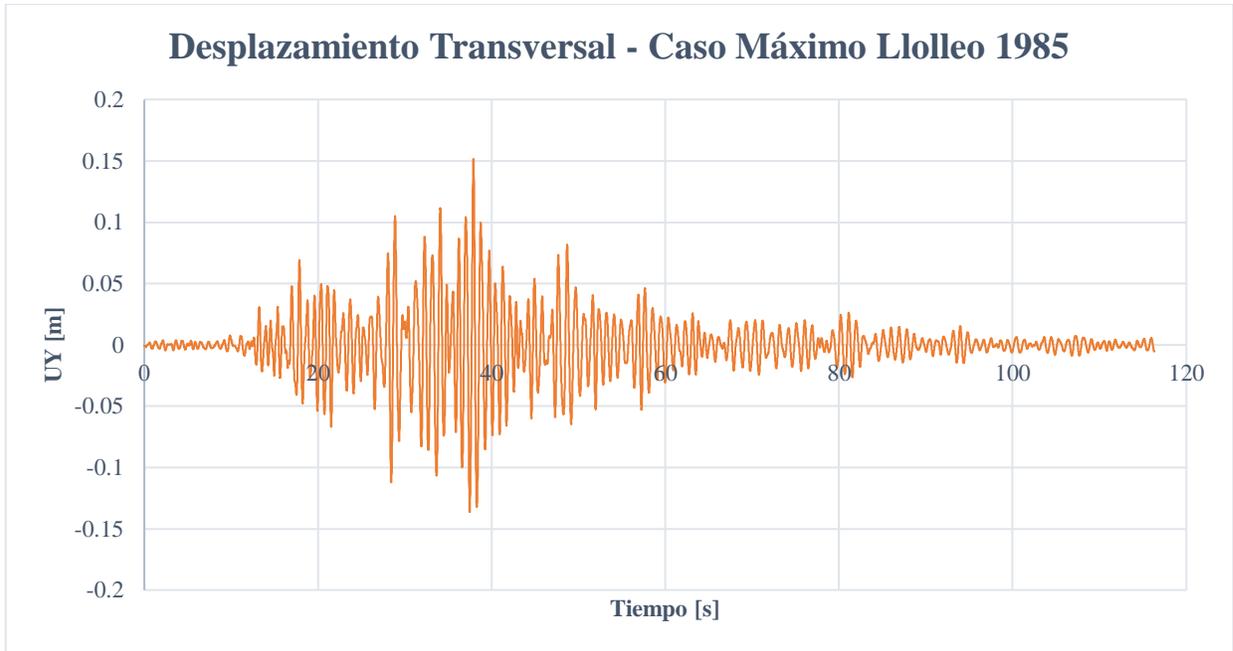
Desplazamiento Transversal - Caso Máximo Matanzas 2010



Desplazamiento Vertical - Caso Máximo Matanzas 2010

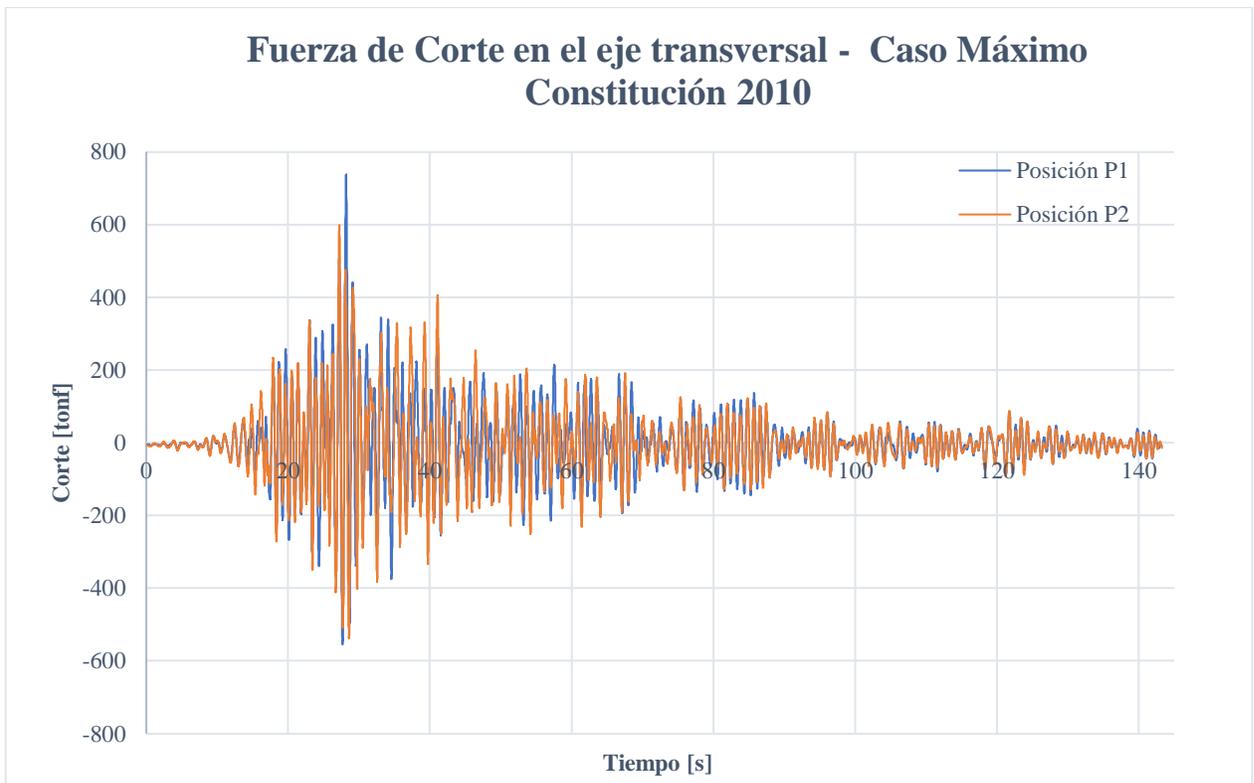
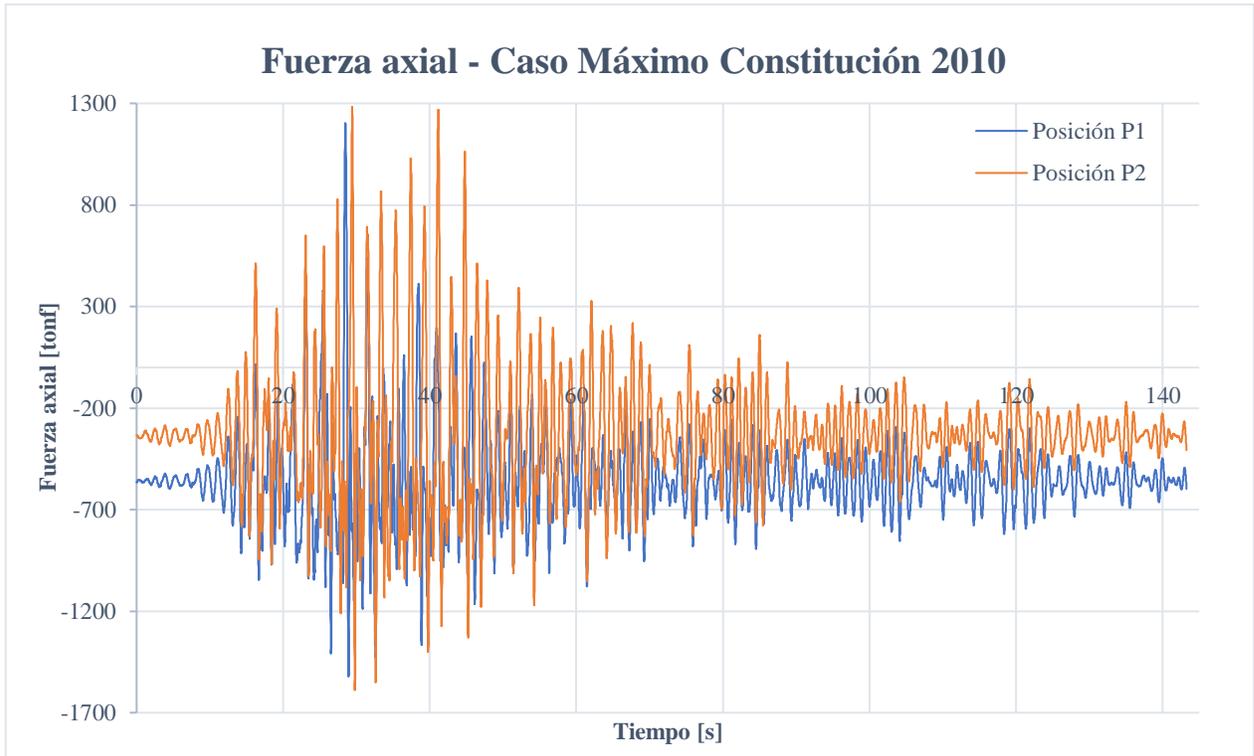


- **Llolleo 1985**

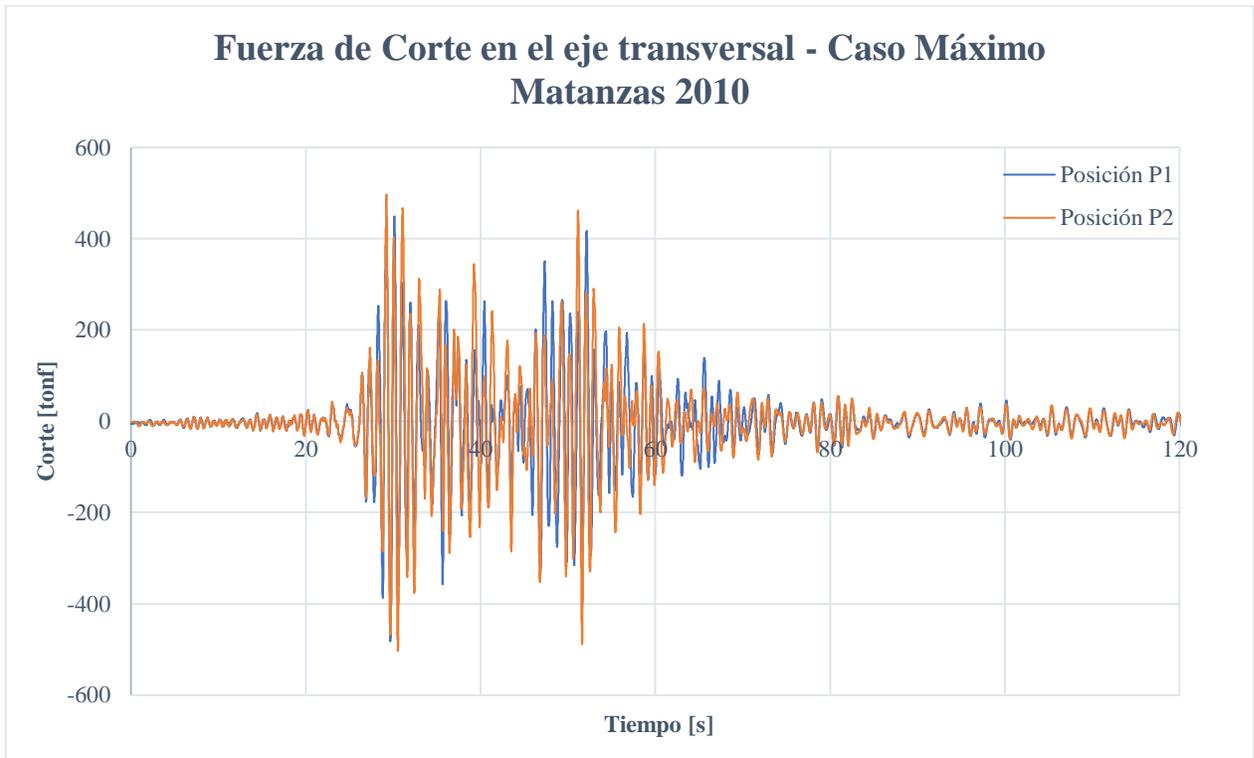
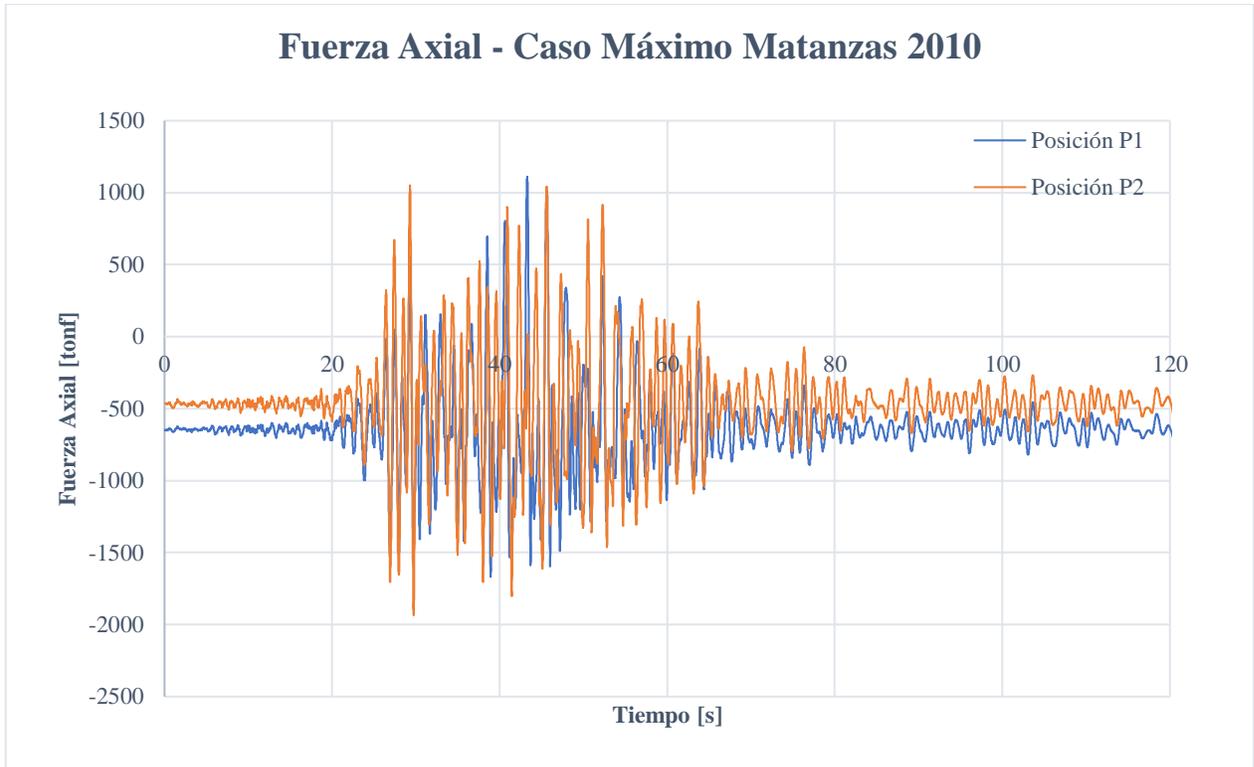


10.4. Anexo D: Máximas fuerzas obtenidas en los eventos sísmicos estudiados

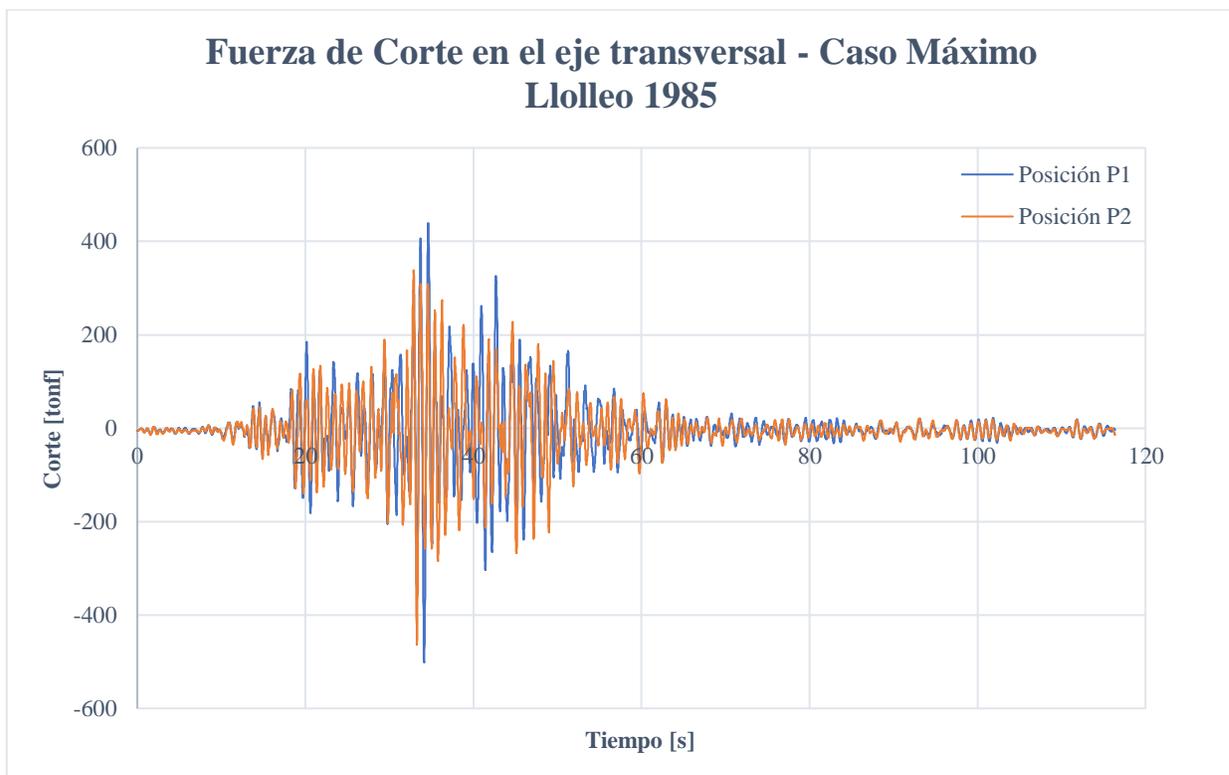
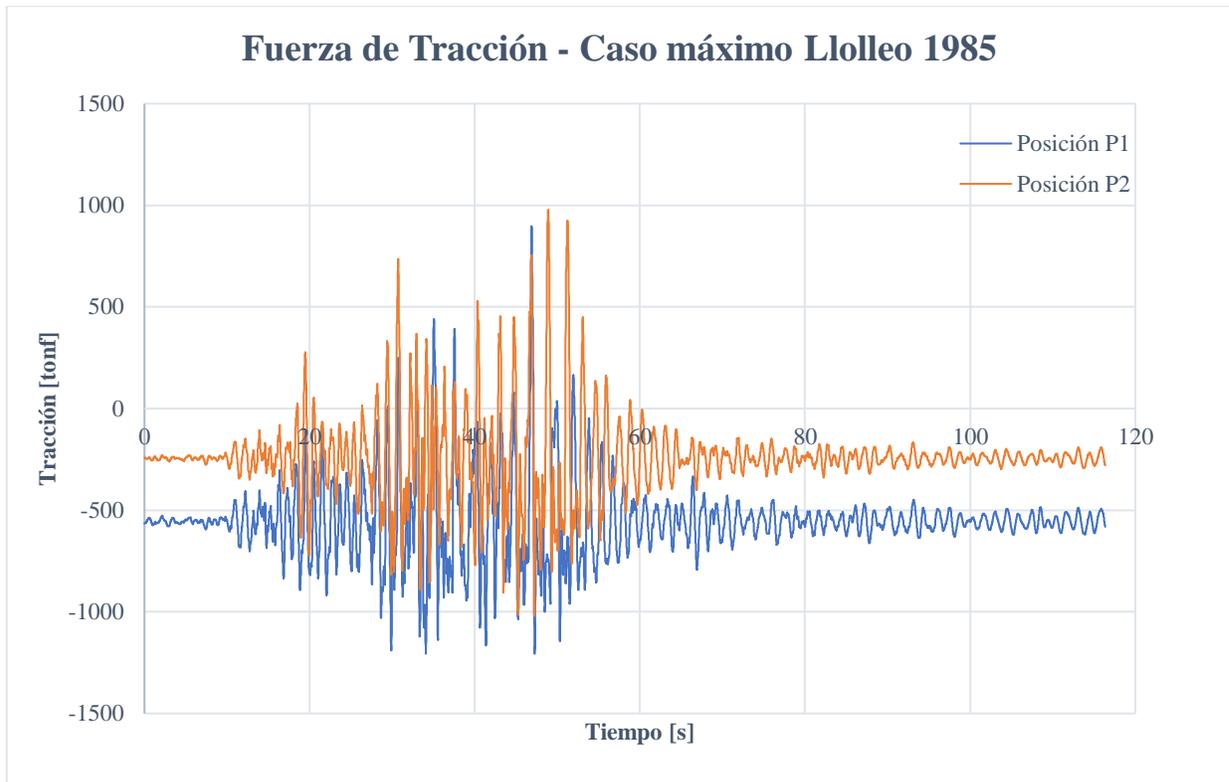
- Constitución 2010



- **Matanzas 2010**



- **Llolleo 1985**



10.5. Anexo E: Diseño de elementos secundarios del sistema de anclaje

Para determinar las fuerzas de diseño de los clamps, pernos de anclaje y placa base se realiza un modelo simple que incorpora las fuerzas de diseño del anclaje vertical y la disposición de los elementos previamente mencionados.

La Figura 10.1 muestra la distribución de los elementos, estos son: la placa base, 8 clamps (de doble perno) soldados a la placa base y 8 pernos de anclaje. Este sistema se replica a lo largo del riel cada 2.5 metros.

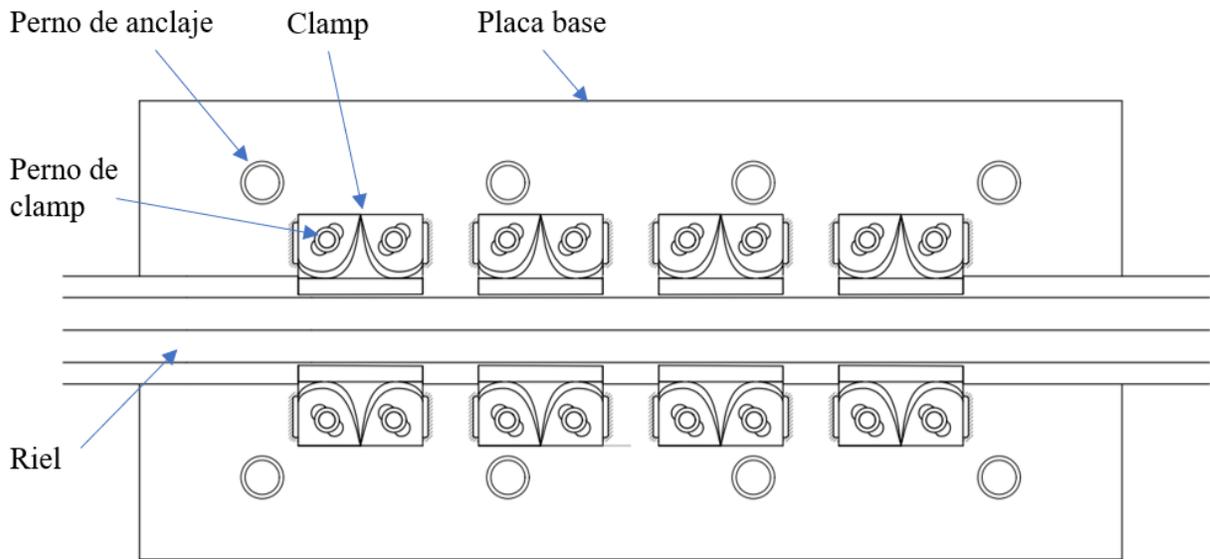


Figura 10.1: Distribución de elementos secundarios.

La Figura 10.2 muestra el modelo de fuerzas desarrollado, el cual considera el sistema de la Figura 10.1 como un resorte de rigidez 5000 [tonf/m], espaciado cada 2.5 metros. Adicionalmente, se incorporan las fuerzas de diseño de los anclajes verticales (448.7 [tonf]) en 4 puntos que simulan la fuerza de tracción que se produce en el bogie.

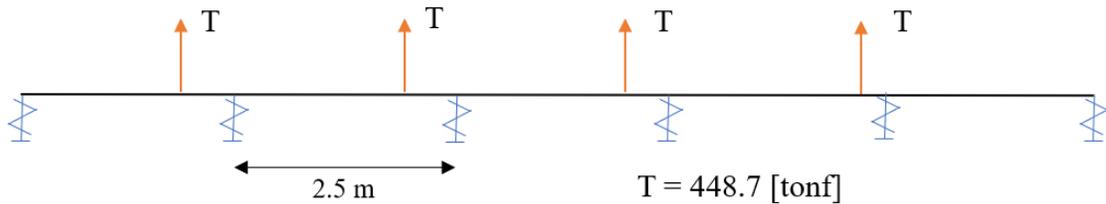


Figura 10.2: Esquema de modelo desarrollado para determinar fuerzas de diseño.

A partir de lo anterior, se tiene que la máxima fuerza en un resorte es de 402 [tonf]. Por lo tanto, los elementos deben ser diseñados para:

Elemento	Cantidad	Fuerza de diseño [tonf]
Clamp	8	50.3
Perno de clamp	16	25.1
Perno de anclaje	8	50.3

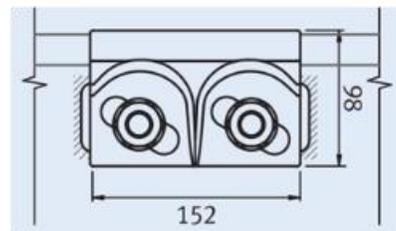
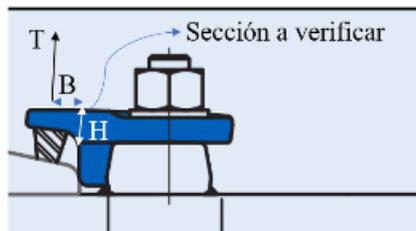
Adicionalmente, los pernos de anclaje son diseñados considerando la máxima fuerza de corte en el eje transversal que tiene un valor de 738 [tonf], amplificada por LRFD (1.4) queda con un valor de 1033 [tonf]. Esta fuerza se distribuye a lo largo de un bogie (10 metros), por lo que a cada sistema compuesto por 8 clamp y 8 pernos de anclaje se le aplica un cuarto de esta fuerza (elementos cada 2.5 metros). Luego, la fuerza de corte aplicada a cada perno es:

Elemento	Cantidad	Fuerza de diseño [tonf]
Perno de clamp	16	16.1
Perno de anclaje	8	32.3

Diseño de elementos:

Clamps

Clamp:



$$T_{clip} := 50.3 \text{ tonnef}$$

$$b := 152 \text{ mm} \quad H := 20 \text{ mm} \quad B := 11 \text{ mm} \quad Fy := 700 \text{ MPa}$$

$$Area := b \cdot H = (3.04 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad W := \frac{b \cdot H^2}{6} = (1.013 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$$

Se tiene que:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{T \cdot B}{W} \quad \tau = \frac{T}{A}$$

Además,

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

Imponiendo,

$$\sigma_{eq} = 0.9 \cdot Fy \quad (LRFD)$$

Entonces,

$$T_{lim} = \frac{0.9 \cdot Fy}{\sqrt{\left(\frac{B}{W}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{1}{Area}\right)^2}}$$

Por lo tanto,

$$T_{lim} := \frac{0.9 \cdot Fy}{\sqrt{\left(\frac{B}{W}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{1}{Area}\right)^2}} = 52.401 \text{ tonnef}$$

Luego, $T_{clip} < T_{limite}$, por lo tanto cumple.

Pernos de clamps

$$T_{perno} := 25.1 \text{ tonnef} \quad V_{perno} := 16.1 \text{ tonnef} \quad C := 1.85$$

$$T := T_{perno} + C \cdot V_{perno} = 54.885 \text{ tonnef} \quad (\text{Baglietto})$$

$$d_{perno} := 30 \text{ mm} \quad R_{trac} := 130 \text{ ksi} \quad \text{ASTM A490}$$

$$A_{perno} := \pi \cdot \left(\frac{d_{perno}}{2} \right)^2 = 706.858 \text{ mm}^2$$

$$N_s := R_{trac} \cdot A_{perno} = 64.606 \text{ tonnef}$$

$$T_{lim} := 0.9 \cdot N_s = 58.146 \text{ tonnef}$$

Luego, $T < T_{lim}$, por lo tanto cumple.

Perno de anclaje

$$T_{perno} := 50.3 \text{ tonnef} \quad V_{perno} := 32.3 \text{ tonnef} \quad C := 1.85$$

$$T := T_{perno} + C \cdot V_{perno} = 110.055 \text{ tonnef}$$

$$d_{perno} := 42 \text{ mm} \quad F_y := 130 \text{ ksi} \quad \text{ASTM A490}$$

$$A_{perno} := \pi \cdot \left(\frac{d_{perno}}{2} \right)^2 = (1.385 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$N_s := F_y \cdot A_{perno} = 126.628 \text{ tonnef}$$

$$T_{lim} := 0.9 \cdot N_s = 113.965 \text{ tonnef}$$

Luego, $T < T_{lim}$, por lo tanto el perno de anclaje cumple.

$$L_d = 17 d \text{ según Baglietto:} \quad L_d := 17 \cdot d_{perno} = 71.4 \text{ cm}$$

Por lo tanto, se utiliza una longitud de perno de 72 cm.

Placa base

A continuación, se presenta el momento máximo al que estará sometida la placa base en función de la fuerza que resiste cada clamp y su posición en ambos ejes.

En el eje longitudinal: $Mu_1 := 1.84 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

En el eje transversal: $Mu_2 := 2.33 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$

$\phi := 0.9$ $F_y := 345 \text{ MPa}$ ASTM A572 gr 50

Dimensiones placa base: $B := 135 \text{ cm}$ $N := 61 \text{ cm}$

Según Baglietto, $\phi \cdot M_n = 0.9 \cdot N \cdot \frac{t^2}{4} \cdot F_y$

Además, $\phi \cdot M_n > M_u$

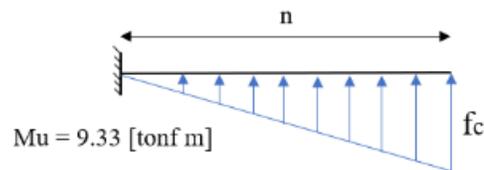
Luego, el espesor t: $t > \sqrt{\frac{4 \cdot M_u}{\phi \cdot N \cdot F_y}}$

Así, $t_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot Mu_1}{\phi \cdot B \cdot F_y}} = 13.122 \text{ mm}$ $t_2 := \sqrt{\frac{4 \cdot Mu_2}{\phi \cdot N \cdot F_y}} = 21.967 \text{ mm}$

Por lo tanto, se opta por un espesor de la placa base de 24 mm.

Compresión en el hormigón

Asumiendo una distribución triangular de tensiones en el borde del eje transversal de la placa base, se tiene:



Luego, $M_u = \frac{n^2 f_c}{3}$

Así, por unidad de ancho la compresión máxima es igual a: $f_c = \frac{3 M_u}{n^2 B}$

La compresión admisible está dada por: $F_c = 0.35 f'_c$

Se debe cumplir: $F_c > f_c$

$$M_u := 9.33 \text{ tonnef} \cdot \text{m} \quad n := 13 \text{ cm} \quad B := 135 \text{ cm} \quad f'_c := 35 \text{ MPa}$$

$$f_c := \frac{3 \cdot M_u}{n^2 \cdot B} = 12.031 \text{ MPa}$$

$$F_c := 0.35 \cdot f'_c = 12.25 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, cumple.

Aplastamiento del hormigón

Se procede a verificar el aplastamiento del hormigón para la máxima fuerza de compresión en un bogie, la que se produce para el registro Matanzas y tiene un valor de 1750 [tonf]. Esta fuerza se amplifica por el factor de amplificación LRFD 1.4. Por lo tanto, la fuerza de compresión es:

$$P := 1.4 \cdot 1750 \text{ tonnef} = (2.45 \cdot 10^3) \text{ tonnef}$$

Esta fuerza es distribuida en 4 placas base por la disposición que se hace de estas (una placa base cada 2.5 metros). Por lo tanto, el aplastamiento a verificar debe ser comparado por:

$$P_u := \frac{P}{4} = 612.5 \text{ tonnef}$$

Luego, según las dimensiones de la placa base y la calidad del hormigón, se procede a comparar la expresión recomendada en Baglietto (P_p) con la compresión última (P_u). Se debe cumplir:

$$\phi_c P_p \geq P_u$$

Donde:

$$\phi_c P_p = 0.6 \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot A$$

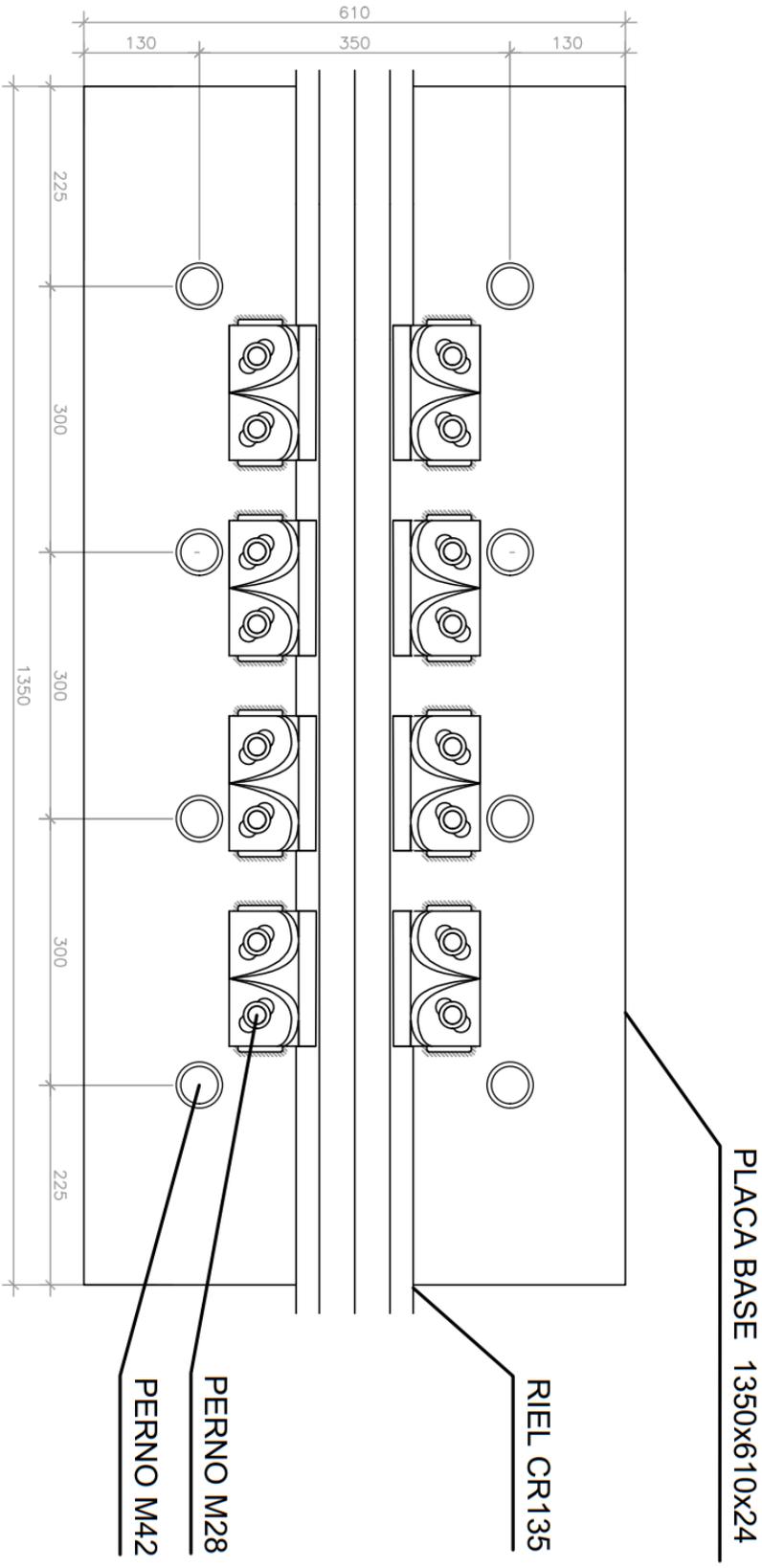
$$B := 135 \text{ cm} \quad N := 61 \text{ cm} \quad f'_c := 35 \text{ MPa}$$

$$A := B \cdot N = (8.235 \cdot 10^3) \text{ cm}^2$$

$$\phi P_p := 0.6 \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot A = (1.499 \cdot 10^3) \text{ tonnef}$$

Por lo tanto, se cumple el requerimiento.

A continuación, se muestra un plano que resume el diseño previamente hecho. Las dimensiones están en milímetros, este sistema debe ir espaciado cada 2.5 metros.



Soldadura

La fuerza de diseño de la soldadura es la misma que la utilizada para diseñar el anclaje (448.7 [tonf]).

$$F_{diseño} := 448.7 \text{ tonnef} \quad \phi := 0.75 \quad (\text{AISC 360-16})$$

$$\text{Filete de soldadura E70:} \quad F_{nw} := 70 \text{ ksi}$$

$$\text{Garganta de filete (t):} \quad w := 24 \text{ mm} \quad t := w \cdot 0.707 = 16.968 \text{ mm}$$

$$\text{Resistencia lineal de la soldadura:} \quad \phi R_n := \phi \cdot 0.707 \cdot w \cdot 0.6 \cdot F_{nw} = 375.785 \frac{1}{m} \cdot \text{tonnef}$$

$$\text{Largo mínimo de soldadura:} \quad L_{min} := \frac{F_{diseño}}{\phi R_n} = 1.194 \text{ m}$$

Se tienen 1.83 metros disponibles para ejecutar la soldadura, por lo tanto utilizando una soldadura E70, de largo 1.83 metros, con ancho de garganta 17 mm se cumple.

