



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS MARÍTIMAS DE FONDEO DE UN DIQUE FLOTANTE

CARLOS PATRICIO RODRÍGUEZ LABRA

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:
JOSÉ LUIS ALMAZÁN

Santiago de Chile, Octubre, 2015.

Silvana, Camilo y Carla, les agradezco por estar juntos y la paciencia que tuvieron mientras me esforzaba por terminar esta difícil tarea...

AGRADECIMIENTOS

Quienes estuvieron conmigo día a día, a veces sin entender, queriendo que les dedicara más tiempo o queriendo jugar son mi señora Silvana e hijos Camilo y Carla, a ustedes les agradezco por haberme soportado cuando estuve cansado e incomprensivo y por estar juntos como antes que las clases empezaran.

Le agradezco a Dios por las oportunidades que he tenido en la vida, esta ha sido una de ellas.

Compatibilizar estudios y trabajo no es tarea fácil, sinceramente creo que de no ser por el apoyo de la ingeniería civil Paula Arias, mi jefa en la empresa GHD S.A., hubiera sido bastante más difícil haber podido asistir a clases y cumplir académicamente a las exigencias del programa, por eso me parece justo recordarla y agradecerle por las facilidades que tuve para estudiar.

A todos los compañeros y compañeras del programa con que compartí experiencias, conversaciones varias y horas de estudio en conjunto, les agradezco ya que sin su apoyo y consejos el camino hubiera sido menos entretenido y más complejo.

Sin duda que mi profesor guía, el señor José Luis Almazán, también tiene mucho que ver con la realización de esta investigación, ya que al presentarle la idea se entusiasmó al punto de que me hizo pensar que el tema era interesante y había que desarrollarlo.

Por último, mi último agradecimiento se lo doy a la Universidad, al Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, y a todos los profesores y colaboradores del programa de magister, pues su contribución en cada una de sus ámbitos de trabajo me ha permitido desarrollar este documento.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Definiciones	1
I.2 Objetivo general	4
I.3 Objetivos específicos.....	4
I.4 Descripción del caso de estudio	5
II. ESTADOS DE CARGA	9
II.1. Resumen de estados de carga	9
II.2. Estados de carga debidos a condiciones meta-oceánicas	11
II.3. Otros estados de carga.....	13
II.4. Estimaciones preliminares de la carga sísmica	13
II.5. Tsunami.....	17
III. ANÁLISIS SÍSMICO PROPUESTO	20
III.1. Ecuación de movimiento.....	20
III.2. Definición de las propiedades de la estructura.....	24
III.2.1. Matriz de masa.....	25
III.2.2. Matriz de rigidez.....	26
III.2.3. Matriz de amortiguamiento.....	30
III.3. Input de ecuación de movimiento	31
III.4. Análisis modal.....	34
IV. DISEÑO A NIVEL CONCEPTUAL	36

IV.1. Dimensionamiento de dolphins convencionales – Pre diseño	36
IV.1.1. Estados de carga	37
IV.1.2. Descripción de las estructuras de fondeo.....	38
IV.1.3. Matriz de masa del conjunto DF - dolphins.....	39
IV.1.4. Matriz de rigidez del conjunto DF - dolphins.....	40
IV.1.5. Matriz de amortiguamiento conjunto DF - dolphins	44
IV.1.6. Análisis sísmico del conjunto DF – dolphins	45
IV.1.7. Obtención de esfuerzos y deformaciones de diseño	66
IV.1.8. Verificación de demanda v/s capacidad	68
IV.1.9. Comentario	69
IV.2. Dimensionamiento de dolphins con aisladores – Diseño definitivo	69
IV.2.1. Objetivos.....	69
IV.2.2. Descripción de los dolphins.....	70
IV.2.3. Procedimiento de diseño.....	71
IV.2.4. Selección de los aisladores elastoméricos	75
IV.2.5. Matriz de masa del conjunto DF - dolphins.....	78
IV.2.6. Matriz de rigidez del conjunto DF - dolphins.....	78
IV.2.7. Matriz de amortiguamiento conjunto DF - dolphins	81
IV.2.8. Análisis sísmico del conjunto DF – dolphins	82
IV.2.9. Obtención de esfuerzos y deformaciones de diseño	102
IV.2.10. Verificación de demanda v/s capacidad de los aisladores ...	102
IV.2.11. Verificación de demanda v/s capacidad de los pilotes	102
IV.2.12. Comentarios.....	103
 V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	 105
 BIBLIOGRAFIA.....	 110
 A N E X O S.....	 111
 Anexo A: RUTINA MATLAB DE RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA	 112
 Anexo B: RUTINA MATLAB DE INTEGRACIÓN DIRECTA	 122
 Anexo C: RUTINA MATLAB PARA MATRIZ DE RIGIDEZ K	 124
 Anexo D: RUTINA MATLAB DE ESPECTROS DE RESPUESTA.....	 126

Anexo E: CONCEPTOS SOBRE AISLAMIENTO SÍSMICO.....	130
E.1. Teoría lineal.....	130
E.2. Propiedades mecánicas de aisladores elastoméricos.....	137

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla II-I: Listado de estados de carga básicos.....	11
Tabla II-II: Cargas meta-océánicas sobre el dique flotante.....	12
Tabla IV-I: Estados de carga del proyecto	37
Tabla IV-II: Masa del conjunto.....	40
Tabla IV-III: Períodos y factores de participación modal dique flotante vacío	42
Tabla IV-IV: Desplazamientos centro de masa de dique flotante vacío	42
Tabla IV-V: Períodos y factores de participación modal de dique flotante cargado	43
Tabla IV-VI: Desplazamientos centro de masa de dique flotante cargado	43
Tabla IV-VII: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado	49
Tabla IV-VIII: Corte basal máximo de dique flotante cargado	50
Tabla IV-IX: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío.....	53
Tabla IV-X: Corte basal máximo de dique flotante vacío	54
Tabla IV-XI: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado.....	59
Tabla IV-XII: Corte basal máximo de dique flotante cargado.....	60
Tabla IV-XIII: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío.....	63
Tabla IV-XIV: Corte basal máximo de dique flotante vacío	64
Tabla IV-XV: Resumen de respuesta de desplazamiento	65
Tabla IV-XVI: Resumen de respuesta de corte basal	65
Tabla IV-XVII: Combinaciones de carga LRFD	66
Tabla IV-XVIII: Combinaciones de carga ASD.....	67
Tabla IV-XIX: Verificación de demanda v/s capacidad de pilotes.....	68
Tabla IV-XX: Masa del conjunto.....	78
Tabla IV-XXI: Períodos y factores de participación modal dique flotante vacío.....	79
Tabla IV-XXII: Desplazamientos centro de masa de dique flotante vacío.....	80
Tabla IV-XXIII: Períodos y factores de participación modal dique flotante cargado	80
Tabla IV-XXIV: Desplazamientos centro de masa de dique flotante cargado	81
Tabla IV-XXV: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado	85
Tabla IV-XXVI: Corte basal máximo de dique flotante cargado	87
Tabla IV-XXVII: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío	90
Figura IV-48: Corte basal con dique flotante vacíoTabla IV-XXVIII: Corte basal máximo de dique flotante vacío	90
Tabla IV-XXIX: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado.....	94
Tabla IV-XXX: Corte basal máximo de dique flotante cargado.....	96
Tabla IV-XXXI: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío.....	99
Tabla IV-XXXII: Corte basal máximo de dique flotante vacío	100
Tabla IV-XXXIII: Resumen de respuesta de desplazamiento	101
Tabla IV-XXXIV: Resumen de respuesta de corte basal.....	101
Tabla IV-XXXV: Verificación de demanda v/s capacidad de aisladores	102
Tabla IV-XXXVI: Verificación de demanda v/s capacidad de pilotes.....	103
Tabla V-I: Períodos fundamentales de vibración [segundos]	107
Tabla V-II: Desplazamientos máximos [m].....	107

Tabla V-III: Corte basal máximo [t]	108
Tabla V-IV: Corte basal máximo según NCh2369 [t]	108

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura I-1: Planos de arreglo general de dique flotante	6
Figura I-2: Planta y elevación	7
Figura I-3: Dique flotante en máxima inmersión	7
Figura I-4: Dique flotante en operación	8
Figura II-1: Espectros de respuesta de registro base de componente longitudinal de Concepción 27F2010.....	15
Figura II-2: Espectros de respuesta de registro base de componente transversal de Concepción 27F2010.....	16
Figura III-1: Definición del problema.....	22
Figura III-2: Registros sísmicos de componente longitudinal - Concepción	32
Figura III-3: Registros sísmicos de componente transversal - Concepción	33
Figura IV-1: Distribución en planta de dolphins.....	38
Figura IV-2: Sección transversal del dolphin típico.....	39
Figura IV-3: Modelo 3D del conjunto dique flotante - dolphins	41
Figura IV-4: Registro de aceleraciones utilizado en el análisis	45
Figura IV-5: Velocidad del suelo obtenida a partir del registro de aceleraciones	46
Figura IV-6: Desplazamiento del suelo obtenido a partir del registro de aceleraciones.....	46
Figura IV-7: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)	47
Figura IV-8: Aceleración total de dique flotante cargado.....	47
Figura IV-9: Velocidad total de dique flotante cargado.....	48
Figura IV-10: Desplazamiento total de dique flotante cargado	48
Figura IV-11: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado	49
Figura IV-12: Corte basal con dique flotante cargado	50
Figura IV-13: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12).....	51
Figura IV-14: Aceleración total de dique flotante vacío.....	52
Figura IV-15: Velocidad total de dique flotante vacío.....	52
Figura IV-16: Desplazamiento total de dique flotante vacío	52
Figura IV-17: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío	53
Figura IV-18: Corte basal con dique flotante vacío	54
Figura IV-19: Registro de aceleraciones utilizado en el análisis	55
Figura IV-20: Velocidad del suelo obtenida de registro de aceleraciones	55
Figura IV-21: Desplazamiento del suelo obtenido a partir de registro de aceleraciones	56
Figura IV-22: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)	56
Figura IV-23: Aceleración total de dique flotante cargado.....	57
Figura IV-24: Velocidad total de dique flotante cargado.....	57
Figura IV-25: Desplazamiento total de dique flotante cargado	58
Figura IV-26: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado	58
Figura IV-27: Corte basal con dique flotante cargado	59
Figura IV-28: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12).....	60
Figura IV-29: Aceleración total de dique flotante vacío.....	61
Figura IV-30: Velocidad total de dique flotante vacío.....	61

Figura IV-31: Desplazamiento total de dique flotante vacío	62
Figura IV-32: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío	62
Figura IV-33: Corte basal con dique flotante vacío	63
Figura IV-34: Sección transversal del dolphin típico con aisladores	70
Figura IV-35: Procedimiento de diseño de dolphins equipados con aisladores sísmicos ...	74
Figura IV-36: Modelo 3D del conjunto dique flotante - dolphins	79
Figura IV-37: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)	83
Figura IV-38: Aceleración total de dique flotante cargado	83
Figura IV-39: Velocidad total de dique flotante cargado	84
Figura IV-40: Desplazamiento total de dique flotante cargado	84
Figura IV-41: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado	85
Figura IV-42: corte basal con dique flotante cargado	86
Figura IV-43: Input de la ecuación de movimiento (Ver ecuación 3-12)	87
Figura IV-44: Aceleración total de dique flotante vacío	88
Figura IV-45: Velocidad total de dique flotante vacío	88
Figura IV-46: Desplazamiento total de dique flotante vacío	89
Figura IV-47: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío	89
Figura IV-48: Corte basal con dique flotante vacíoTabla IV-XXVIII: Corte basal máximo de dique flotante vacío	90
Figura IV-49: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)	91
Figura IV-50: Aceleración total de dique flotante cargado	92
Figura IV-51: Velocidad total de dique flotante cargado	92
Figura IV-52: Desplazamiento total de dique flotante cargado	93
Figura IV-53: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado	93
Figura IV-54: Corte basal con dique flotante cargado	95
Figura IV-55: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)	96
Figura IV-56: Aceleración total de dique flotante vacío	97
Figura IV-57: Velocidad total de dique flotante vacío	97
Figura IV-58: Desplazamiento total de dique flotante vacío	98
Figura IV-59: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío	98
Figura IV-60: Corte basal con dique flotante vacío	99

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a una propuesta de procedimiento de diseño sísmico aplicado a unas estructuras marítimas conectadas a un artefacto naval. Estas estructuras cumplen la función de mantener en una posición deseada al artefacto naval incluso en las más extremas condiciones ambientales en las que este presta servicio durante su vida útil.

El procedimiento de diseño sísmico corresponde al cálculo de la historia de la respuesta del conjunto conformado por un dique flotante de 60,000 toneladas de capacidad de levante y ocho dolphins a los cuales se encuentra conectado. La ecuación de movimiento que permite calcular esta respuesta considera tres grados de libertad ubicados en el centro de masa del conjunto. La respuesta obtenida está referida a un sistema de coordenadas absoluto, que toma en cuenta la respuesta de la masa y la de su base. La aplicación de este procedimiento requiere de registros sísmicos en el área del proyecto.

La masa de los dolphins representa entre el 1.8% y el 3.3% de la masa total involucrada en el análisis. De esto se infiere que la masa total del caso de estudio es variable, ya que depende de la condición de carga del dique flotante. En relación a los períodos de vibración del conjunto, estos están comprendidos en el rango de 7 a 16 segundos.

Se incluye la aplicación de aisladores sísmicos en los dolphins, siendo el producto final obtenido un diseño a nivel de ingeniería conceptual de estas estructuras.

Este procedimiento considera las características específicas del caso de estudio, a falta de publicaciones y una normativa chilena específica para este tipo de proyectos.

ABSTRACT

This work refers to proposing of a seismic design procedure suitable to analyze one or more marine structures connected to any naval craft. The function of these marine structures is to keep in a fixed position the naval craft before whatever environmental conditions during its service life.

The seismic design procedure corresponds to the calculation of the response through a time-history analysis of a floating dock of 60,000 t lifting capacity connected to eight mooring dolphins exposed to an earthquake. This approach considers an equation of motion that takes into account three degrees of freedom located in the center of mass of the project. The response obtained with the equation of motion is linked to an absolute coordinate system which considers the response of the mass and the ground. Seismic records of earthquakes happened near the project location are needed to use this procedure.

The mass of the marine structures ranges from 1.8% to 3.3% of the total mass involved in the analysis, which means that the mass is a variable parameter in this case study due to it depends on the load conditions of the floating dock. Regarding to the period of vibration of the project, they range from 7 to 16 seconds.

Seismic isolators are introduced in the mooring dolphins as part of these structures. The product of this work is the conceptual design of these marine structures.

This procedure considers the specific characteristics of this case study due to the lack of design guidelines, recommendations and a Chilean standard suitable to this specific sort of projects.

I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explican los objetivos del trabajo, se presenta el caso de estudio y se dan algunas definiciones que permiten comprender algunos conceptos de ingeniería portuaria a lectores no familiarizados con esta área de especialización.

I.1 Definiciones

A continuación se definen algunos conceptos que permiten mejorar la comprensión de este trabajo.

Artefacto naval: es una construcción flotante que carece de propulsión propia, que opera en el medio marino. En el evento que el artefacto naval se destine al transporte con el apoyo de una nave, se entenderá el conjunto como una misma unidad de transporte.

Babor: es el costado izquierdo del casco, considerando al observador viendo de popa a proa.

Calado (D): distancia vertical entre la línea de flotación y la quilla de un buque o artefacto naval, en una determinada condición de carga.

Casco: armazón o estructura interna de un barco.

Defensa: elemento que se coloca al costado de una embarcación o muelle para proteger tanto al barco como a la estructura de los golpes durante la maniobra de ataque y desataque.

Desplazamiento (Δ): equivale al peso del volumen de agua desplazado por un buque o artefacto naval, en una determinada condición de carga.

Dique flotante: corresponde a un artefacto naval que mediante inundación de tanques, hunde su casco para permitir que el buque a reparar ingrese en su seno. Una vez en su sitio, el agua es extraída de los tanques provocando la elevación del conjunto, logrando así la puesta en seco.

Dolphin: también denominado duque de alba, corresponde a una obra marítima aislada que se utiliza para soportar la fuerza de atraque y/o de amarre de un buque.

Dragado: excavación realizada bajo agua para conseguir la profundidad de agua que permita la operación de un buque en condiciones seguras en un área de flotación de un puerto o vía de navegación.

Eslora (L): longitud máxima del casco del buque medida de proa a popa.

Estribor: es el costado derecho del casco, considerando al observador viendo de popa a proa.

Fondeo: un sistema o elemento de fondeo es el encargado de mantener en una posición deseada fija un buque o artefacto naval aun en las condiciones más severas de viento, corrientes y oleaje.

Francobordo (G): distancia vertical entre la cubierta principal de un buque o artefacto naval y la línea de flotación, en una determinada condición de carga.

Hinca: proceso de instalación de un pilote, que requiere de la utilización de un martinete y grúa generalmente.

Manga (B): ancho máximo de un buque o artefacto naval.

Martinete: equipo de construcción, que suspendido de una grúa permite la instalación de un pilote en el terreno mediante golpes en su parte superior o cabeza.

Muelle: estructura de atraque y amarre fija que conforma una línea de atraque continua, que en general excede en longitud al buque amarrado, y que está conectada con la costa total o parcialmente mediante rellenos a lo largo de la parte posterior de la misma, dando lugar a la creación de explanadas traseras adosadas (*wharf* en inglés, también referido como muelle paralelo a la costa).

Muelle opaco: corresponde a un muelle perpendicular o paralelo a la costa, cuya estructuración la componen elementos de contención y rellenos, que obstruyen el paso del agua.

Muelle transparente: corresponde a un muelle perpendicular o paralelo a la costa, cuya estructuración posee fundaciones como pilotes, que no obstruyen el paso del agua bajo el nivel del tablero.

Nivel de reducción de sondas (NRS): es el plano al cual están referidas las profundidades de una localidad. Dado que el tipo de marea predominante en el litoral chileno corresponde al de marea semi-diurna mixta, se adoptó para nuestras costas como nivel de reducción de sondas el plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en el perigeo.

Obra viva: corresponde a la superficie sumergida del casco de un buque.

Obras muerta: corresponde a la parte del casco de un buque que está fuera del agua.

Pilote: corresponde a una fundación de tipo profunda, utilizado en proyectos de infraestructura, similar a una columna.

Pontón: es un tipo de embarcación o casco, generalmente en forma de paralelepípedo, que se utiliza como muelle o plataforma de trabajo.

Popa: parte posterior del casco con forma y dimensiones tales que faciliten el paso del agua que llena el vacío provocado por el avance del barco y alojar los elementos de gobierno y propulsión.

Proa: parte delantera del casco de forma afilada para ofrecer el mínimo de resistencia al agua.

Puntal (T): distancia vertical máxima entre la cubierta principal de un buque o artefacto naval y su quilla.

Quilla: es la parte principal del casco, formada por una pieza robusta de hierro o acero fundido que corre longitudinalmente y al centro en la parte inferior del casco y que va de proa a popa. Sobre la quilla descansa el conjunto de todas las demás piezas.

I.2 Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es diseñar, a nivel de ingeniería conceptual y mediante análisis lineal elástico, las estructuras marítimas de fondeo de un dique flotante ubicado en la costa de la región del Bío Bío, tomando en cuenta la totalidad de los estados de carga que actuarán durante su vida útil.

I.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes:

- Proponer un procedimiento para calcular la respuesta sísmica del conjunto de estructuras marítimas de fondeo del dique flotante, que considere que la masa

total involucrada en el análisis corresponde a la suma de las masas del artefacto naval y de las obras de fondeo.

- Para las solicitaciones y/o desplazamientos sísmicos encontrados con el procedimiento indicado en el punto precedente, dimensionar los pilotes o una combinación de pilotes y aisladores sísmicos requeridos por las estructuras marítimas de fondeo.

I.4 Descripción del caso de estudio

Se requiere diseñar las obras portuarias que permiten fondear un dique flotante de las siguientes dimensiones:

- Eslora, $L = 320$ metros
- Manga, $B = 75$ metros
- Calado, $D = 5.4$ metros en funcionamiento a máxima carga, el que puede llegar a 20 metros en máxima inmersión para permitir que los buques a reparar se alojen en su interior.
- Francobordo, $G = 0.4$ a 0.8 metros
- Puntal, $T = 5.8$ a 6.2 metros

La siguiente figura muestra los planos de arreglo general del dique flotante.

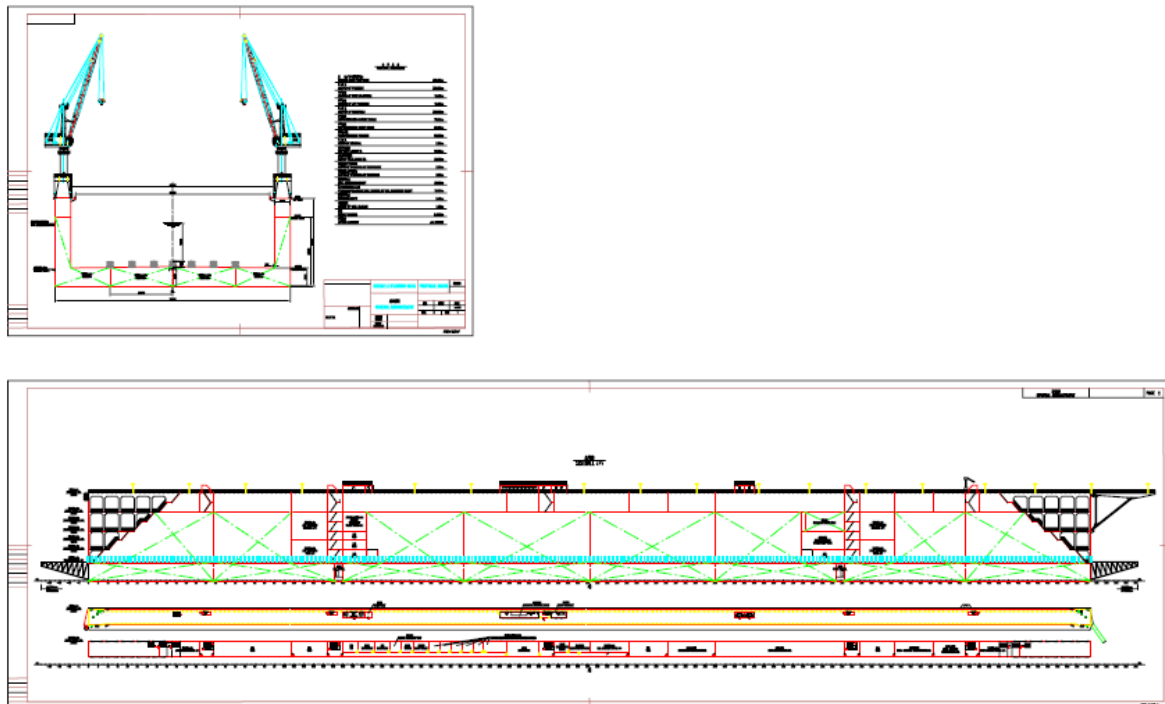


Figura I-1: Planos de arreglo general de dique flotante

La capacidad de levante máxima y los desplazamientos con y sin carga del dique flotante son los siguientes:

Capacidad de levante = 60,000 ton

Dique flotante cargado

D = 5.4 metros
 Δ = 133,488 toneladas

Dique flotante vacío

D = 2.97 metros
 Δ = 73,488 toneladas

Por la necesidad de inmersión del dique flotante se requiere dragar el área del proyecto hasta la cota -22 m NRS.

Las siguientes figuras muestran en forma esquemática cómo los fondeos mantienen en una posición deseada al dique flotante.

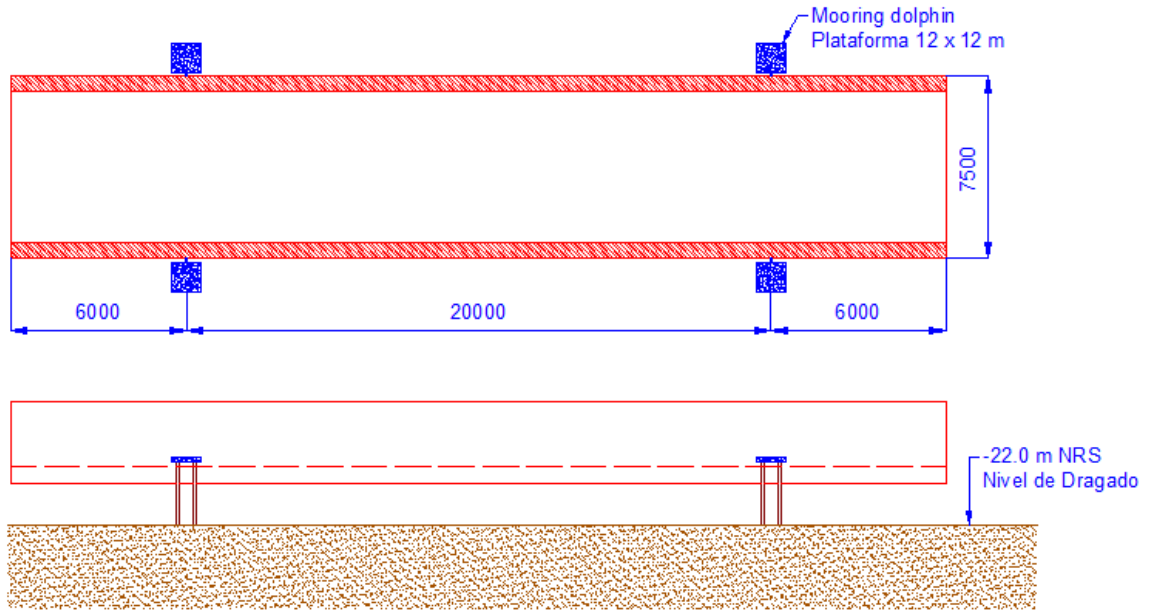


Figura I-2: Planta y elevación

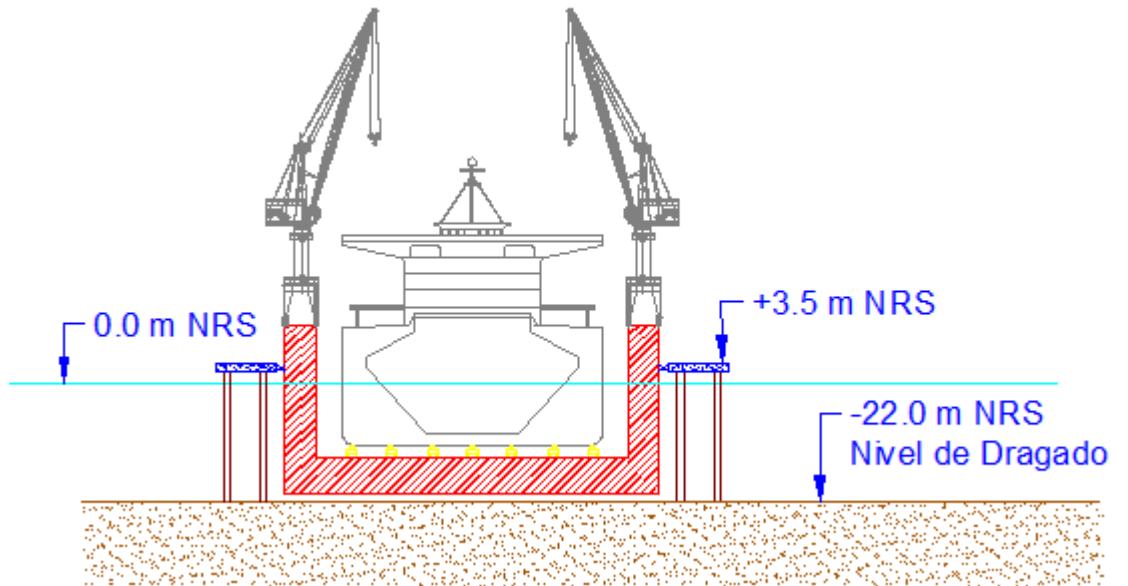


Figura I-3: Dique flotante en máxima inmersión

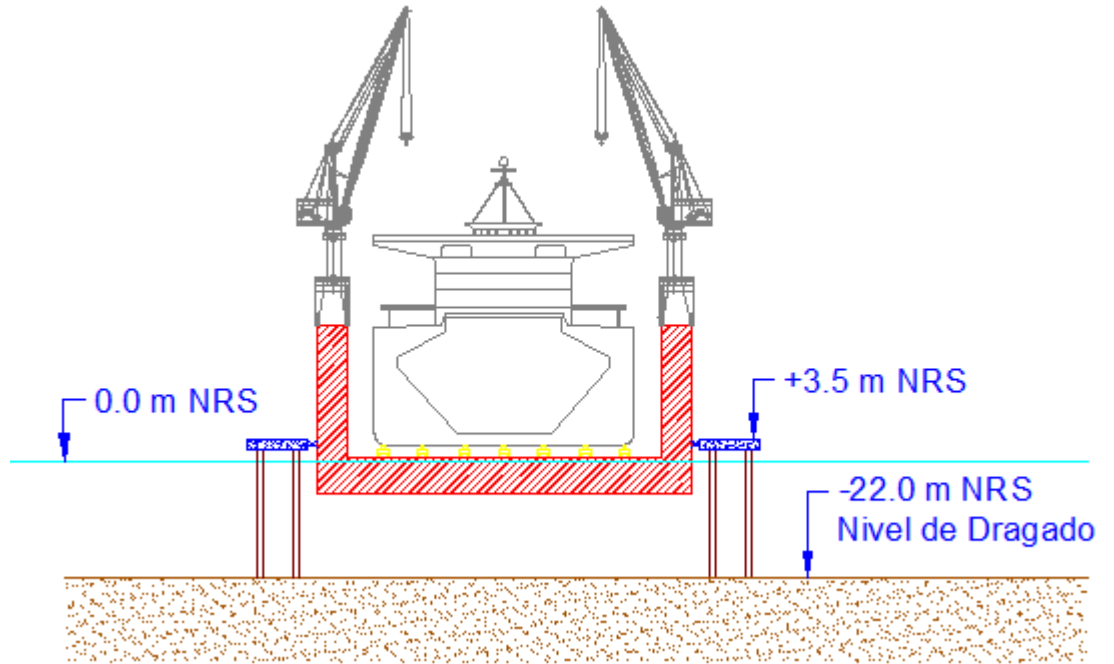


Figura I-4: Dique flotante en operación

II. ESTADOS DE CARGA

En este capítulo se describen las cargas o condiciones de servicio que se espera estén presentes durante la vida útil del caso de estudio.

II.1. Resumen de estados de carga

A nivel preliminar, se puede comentar que el caso de estudio está expuesto a estados de carga producidos por condiciones meta-oceánicas, es decir, la corriente, oleaje y viento, y otro tipo de cargas que podría incluir fuerzas de atraque y amarre de buques, empujes de tierra, sobrecargas de uso, esfuerzos transmitidos por equipos de manipulación de carga (el caso de grúas), sismos y tsunamis, siendo el último fenómeno posible en caso de terremotos excepcionalmente severos.

En general, existen varias recomendaciones y publicaciones internacionales que incluyen procedimientos para estimar las cargas producidas por condiciones meta-oceánicas y la fuerza de atraque de buques sobre los elementos que componen la infraestructura marítima y portuaria. Adicionalmente, en esta bibliografía también se pueden encontrar estimaciones de fuerzas de amarre de buques sobre la infraestructura, aunque para la mayoría de los proyectos importantes estas fuerzas suelen investigarse mediante la utilización de modelos numéricos que consideran las condiciones meta-oceánicas del sitio, las características del buque de diseño y del frente de atraque, entre otros parámetros.

Las cargas meta-oceánicas son posibles de estimar y aplicar sobre la estructura directamente y también sobre el artefacto naval. El efecto del resto de solicitaciones, como empujes de tierra, sobrecargas de uso y esfuerzos transmitidos por equipos de manipulación de carga, se deben estimar y aplicar sobre los elementos de la infraestructura.

Dependiendo del tipo de carga o función del puerto, es posible también encontrar en la bibliografía valores de sobrecargas de uso y estimaciones de las cargas transmitidas a la estructura por los equipos de manipulación de mercancías dependiendo de su tipo y tamaño. En este último caso, los fabricantes de equipos pueden proveer de información más precisa de las descargas verticales y horizontales que la maquinaria transmite a la infraestructura por medio de sus ruedas o apoyos.

Con respecto a los sismos, en Chile existen tres normas para estimar la demanda sísmica sobre una estructura, NCh433, NCh2369 y NCh2745, de diseño sísmico de edificios, diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales y de análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, respectivamente. El alcance de estas tres normativas no incluye obras marítimas en forma expresa, no obstante, la práctica común es utilizar NCh2369 en el caso de muelles u obras portuarias transparentes, es decir, estructuras cuya tipología genérica considera pilotes que soportan un tablero compuesto por vigas y losas.

A continuación se hace referencia a la publicación de la Unified Facilities Criteria UFC 4-152-1, Design: Piers and Wharves, año 2005, en la denominación de los

estados de carga. Los estados de carga W_a , W_{as} y T_s han sido agregados al listado para considerar todos los estados de carga que deben considerarse en este tipo de proyectos.

Tabla II-I: Listado de estados de carga básicos

Símbolo	Definición de la carga
D	Carga de peso propio
L_u	Sobrecarga de uso (uniformemente distribuida)
L_c	Sobrecarga de uso (concentrada)
I	Carga de impacto (en general solo para L_c)
B	Carga por boyantes
B_e	Carga de atraque
C	Carga de corriente sobre la estructura
C_s	Carga de corriente sobre la nave
E	Carga de empuje de tierra
E_q	Carga de sismo
W	Carga de viento sobre la estructura
W_s	Carga de viento sobre la nave
W_a	Carga de oleaje sobre la estructura
W_{as}	Carga de oleaje sobre la nave
T_s	Carga de tsunami
R	Carga por creep
S	Carga por retracción
T	Carga por variación de temperatura
Ice	Carga por presión de hielo

II.2. Estados de carga debidos a condiciones meta-oceánicas

Las cargas debidas a viento, corrientes y oleaje que actúan sobre el dique flotante se presentan en la siguiente tabla.

Tabla II-II: Cargas meta-oceánicas sobre el dique flotante

Dir	Dique	Calado	Viento			Corrientes		Oleaje Sea		Oleaje Swell	
			FTV (t)	FLV (t)	MTV (t-m)	FTc (t)	FLc (t)	FTW (t)	FLW (t)	FTW (t)	FLW (t)
N	DF Lastre	5.4	-520	92	-17,469	-71	0.0	6.2	2.4	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	-622	369	-13,932	-71	0.0	6.2	2.4	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	-760	420	-17,022	-71	0.0	6.2	2.4	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	-652	363	-14,609	-71	0.0	6.2	2.4	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	-635	424	-14,222	-71	0.0	6.2	2.4	0.2	0.1
NE	DF Lastre	5.4	146	22	5,606	71	0.0	2.1	0.8	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	178	91	4,555	71	0.0	2.1	0.8	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	217	104	5,566	71	0.0	2.1	0.8	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	187	89	4,777	71	0.0	2.1	0.8	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	182	104	4,649	71	0.0	2.1	0.8	0.2	0.1
E	DF Lastre	5.4	316	8	2,935	71	0.0	44.2	17.0	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	429	37	3,704	71	0.0	44.2	17.0	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	523	43	4,517	71	0.0	44.2	17.0	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	449	37	3,878	71	0.0	44.2	17.0	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	439	43	3,793	71	0.0	44.2	17.0	0.2	0.1
SE	DF Lastre	5.4	500	-15	-13,429	71	0.0	49.0	-21.8	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	675	-68	18,137	71	0.0	49.0	-21.8	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	823	-78	22,123	71	0.0	49.0	-21.8	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	706	-67	18,990	71	0.0	49.0	-21.8	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	691	-79	18,561	71	0.0	49.0	-21.8	0.2	0.1
S	DF Lastre	5.4	232	-41	-10,385	71	0.0	7.2	-18.6	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	261	-155	5,855	71	0.0	7.2	-18.6	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	320	-177	7,178	71	0.0	7.2	-18.6	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	275	-153	6,159	71	0.0	7.2	-18.6	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	265	-177	5,944	71	0.0	7.2	-18.6	0.2	0.1
SW	DF Lastre	5.4	-336	-51	17,187	-71	0.0	-8.7	-19.5	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	-389	-199	-9,951	-71	0.0	-8.7	-19.5	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	-476	-227	-12,197	-71	0.0	-8.7	-19.5	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	-409	-196	-10,466	-71	0.0	-8.7	-19.5	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	-395	-227	-10,100	-71	0.0	-8.7	-19.5	0.2	0.1
W	DF Lastre	5.4	-401	-10	9,747	-71	0.0	-6.0	-2.3	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	-543	-47	-13,200	-71	0.0	-6.0	-2.3	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	-662	-54	-16,099	-71	0.0	-6.0	-2.3	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	-568	-47	-13,819	-71	0.0	-6.0	-2.3	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	-556	-55	-13,513	-71	0.0	-6.0	-2.3	0.2	0.1
NW	DF Lastre	5.4	-545	16	-6,281	-71	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
	DF+Petrolero	5.4	-738	75	-6,609	-71	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
	DF+Gasero	5.4	-900	85	-8,060	-71	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
	DF+Granelero	5.4	-772	73	-6,919	-71	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
	DF+Portacontenedores	5.4	-755	86	-6,765	-71	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1

II.3. Otros estados de carga

Adicional a los estados de carga por condiciones meta-oceánicas y sismo, el diseño conceptual de este caso de estudio considera las siguientes cargas:

- Sobrecarga de uso en dolphins, $L_u = 500 \text{ kg/m}^2$
- Variación de temperatura, T, equivalente a 15°C

Para la realización de esta investigación no se contó con información que permitiera estimar las cargas de tsunami sobre el proyecto, por tanto, en el capítulo IV no se considera este importante estado de carga en su dimensionamiento. En la sección II.5 se entrega una breve reseña de este estado de carga.

II.4. Estimaciones preliminares de la carga sísmica

En esta etapa no se conoce el número y dimensiones de los miembros estructurales de las obras portuarias de fondeo que requiere el dique flotante para mantenerse en la posición deseada, por tanto, en este apartado se busca valores que representen órdenes de magnitud de la carga sísmica sobre el proyecto y permitan su comparación con los otros estados de carga, que ya son conocidos.

El registro sísmico más cercano a la ubicación del proyecto es el del terremoto del 27 Febrero 2010 medido en Concepción. Este registro se encuentran disponible en el sitio web <http://terremotos.ing.uchile.cl/registros/164>.

Los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento asociados a este registro sísmico se muestran en las siguientes figuras, para amortiguamiento de 5% y dirección longitudinal (L) y transversal (T).

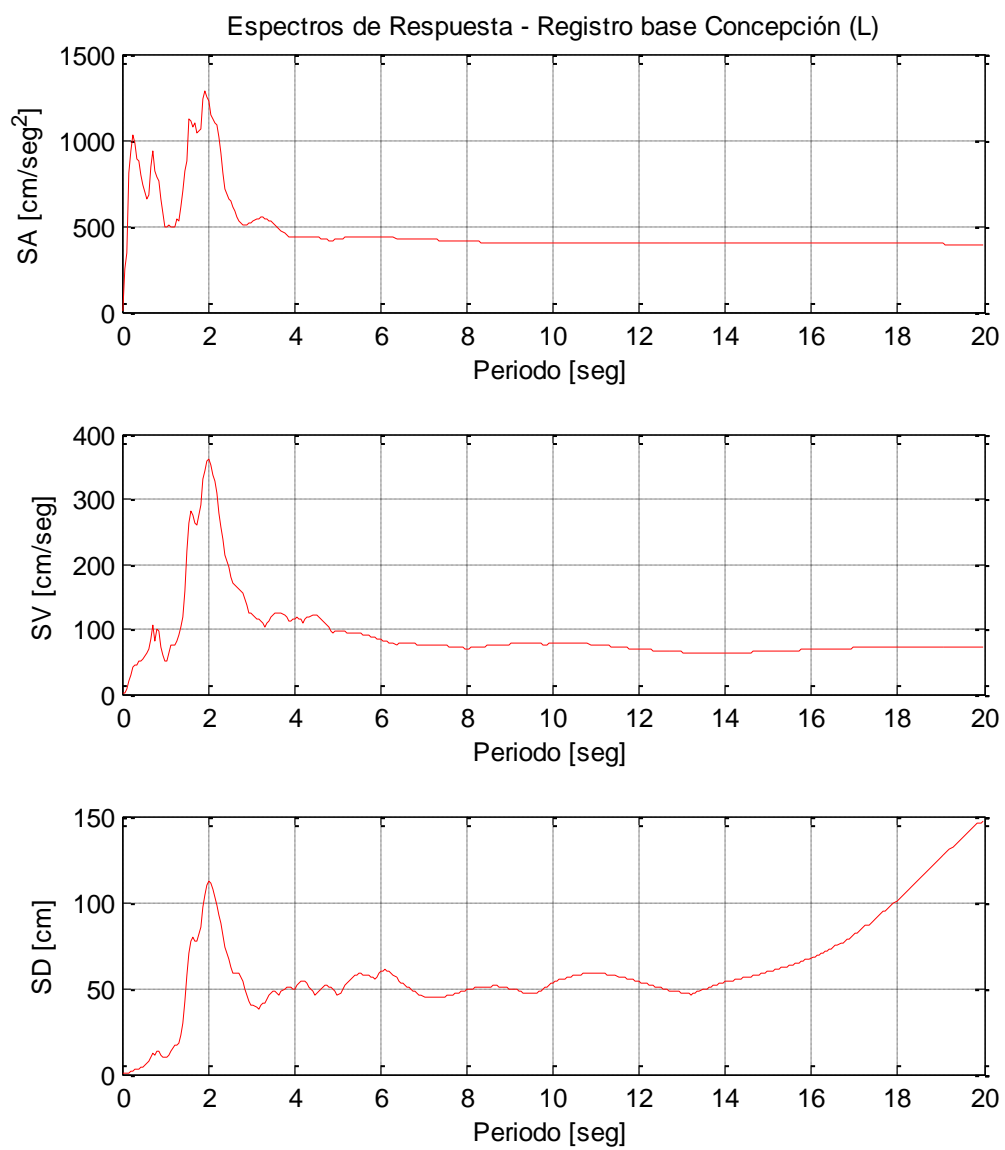


Figura II-1: Espectros de respuesta de registro base de componente longitudinal de Concepción 27F2010

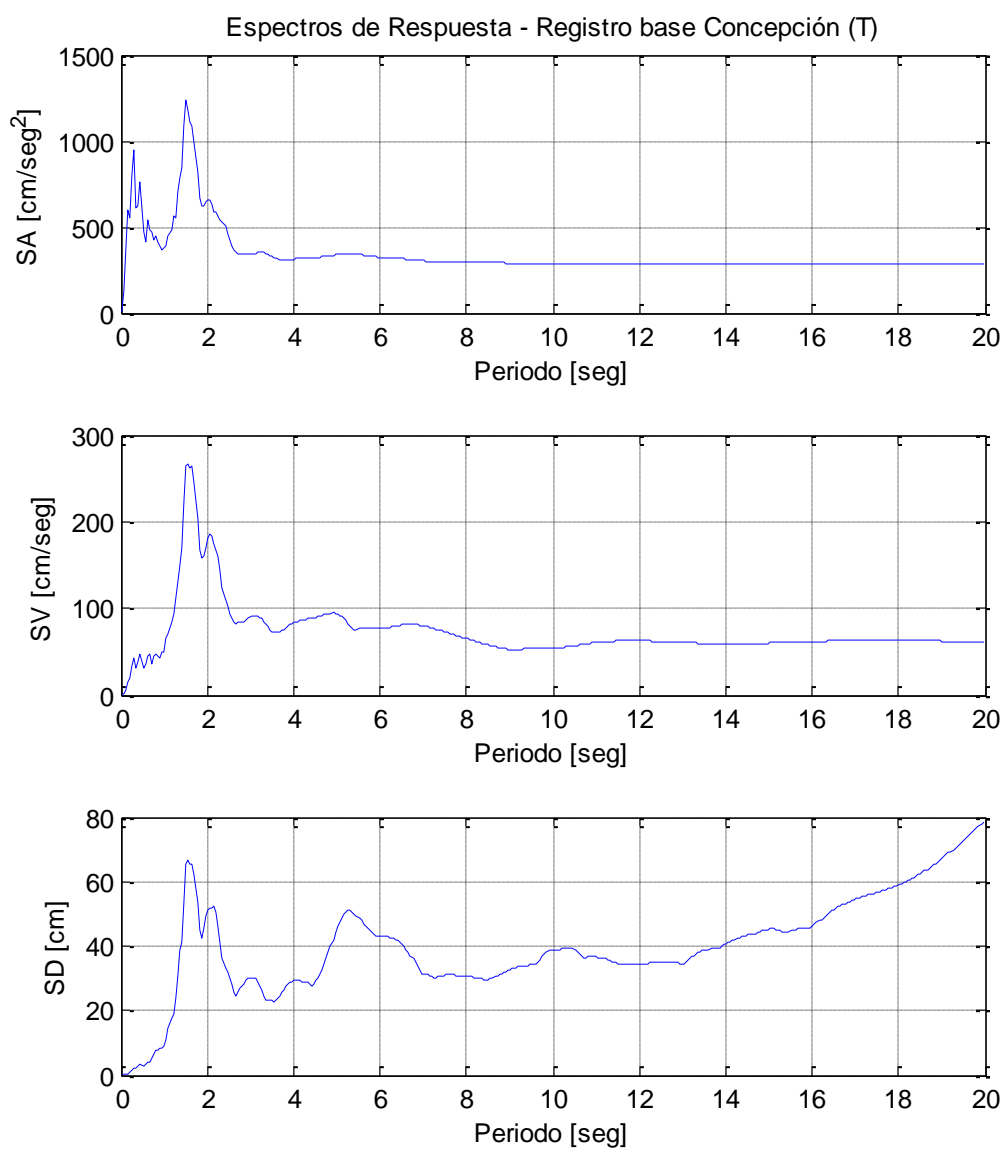


Figura II-2: Espectros de respuesta de registro base de componente transversal de Concepción 27F2010

Por la magnitud de la masa involucrada en este problema, se supone que el período de vibración del proyecto, es decir, el dique flotante conectado a sus obras marítimas

de fondeo, podría ser superior a 2 segundos, cuestión que será confirmada en los capítulos siguientes de este documento.

Según lo indicado en las figuras anteriores, la respuesta de desplazamiento de un oscilador de un grado de libertad entre los 3 y 14 segundos es cercana a los 50 y 40 cm aproximadamente para las componentes longitudinal y transversal del registro, respectivamente. Para el rango de periodos fuera del intervalo indicado previamente la respuesta en desplazamiento es variable y está directamente relacionada con el periodo de vibración del oscilador.

Por lo anterior, en esta etapa se dispone de valores referenciales de desplazamiento ante carga sísmica del dique flotante del orden de 50 cm, que podrían afectar a sus estructuras de fondeo.

II.5. Tsunami

La carga de tsunami sobre los miembros estructurales de una obra marítima puede estimarse si se conoce la velocidad y altura del nivel de agua (altura de inundación) sobre el sitio en estudio, sea este cercano a la costa o en una ubicación offshore.

La velocidad y cotas de inundación pueden obtenerse mediante modelaciones numéricas, las cuales requieren de un input consistente en la deformación del fondo del mar en la zona de ruptura del terremoto, la coincide con la deformación inicial de la superficie libre del océano.

Una vez conocida la velocidad y altura de inundación en el sitio de interés es posible estimar la fuerza que el tsunami produce sobre los elementos estructurales del proyecto aplicando alguna expresión basado en la velocidad de la corriente, por ejemplo:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_n \quad (2-1)$$

En donde:

F_D = Fuerza de arrastre constante [KN]

C_D = Coeficiente de arrastre (adimensional)

ρ = densidad del agua [t/m^3]

V = velocidad de la corriente incidente [m/s]

A_n = Área del elemento expuesta a la corriente (proyección normal) [m^2]

En el presente caso de estudio, en que un artefacto naval está conectado a unas estructuras de fondeo, estas deben ser diseñadas para resistir el paso del tsunami que actúa tanto sobre el artefacto naval como sobre la infraestructura portuaria.

La fuerza de tsunami podría ser aplicada solo a las obras de fondeo si es que la infraestructura posee un procedimiento que estipule y asegure el zarpe hacia aguas profundas del artefacto flotante bajo amenaza de tsunami.

III. ANÁLISIS SÍSMICO PROPUESTO

En el alcance de este capítulo, se incluye la modelación del problema, se declara la forma de la ecuación de movimiento que describe el comportamiento del sistema analizado y se describe la forma de obtener la respuesta en desplazamiento y corte basal de este.

Como se expone en los siguientes apartados de este capítulo, el problema analizado en este trabajo escapa al alcance de las normativas de diseño sísmico disponibles en Chile y tampoco existen recomendaciones internacionales conocidas hasta ahora que aborden la determinación de la demanda sísmica y su análisis.

A la fecha de elaboración de este documento, se ha encontrado que la publicación UFC 4-159-03, 2005 “Design: Moorings”, Unified Facilities Criteria, menciona ejemplos de esta tipología de obra marítima en su alcance, aunque no contiene disposiciones relacionadas con diseño sísmico.

III.1. Ecuación de movimiento

El desafío consiste en considerar la actuación acoplada del dique flotante y sus obras marítimas de fondeo bajo la acción de un sismo. Como ya se ha indicado en el capítulo I, los elementos de fondeo corresponden genéricamente a estructuras portuarias que permiten mantener el artefacto naval en posición de proyecto bajo la acción de los estados de carga identificados previamente, y transmitir los esfuerzos resultantes al suelo de fundación.

La ecuación de movimiento que se describe a continuación considera las siguientes hipótesis:

- Debido a que el agua no transmite esfuerzos de corte, se considera que bajo acción sísmica el artefacto flotante permanece en una posición aproximadamente estática, en cambio, el sismo sí produce deformaciones al suelo y a las obras de fondeo. Esto justifica la adopción de un sistema de coordenadas absoluto para calcular la respuesta en desplazamiento del sistema.
- Los elementos de fondeo restringen los movimientos del artefacto naval en solo una o ambas direcciones ortogonales. Por lo anterior, en general se considera que el sistema posee tres grados de libertad, dos desplazamientos horizontales y un giro en planta, los que se suponen actuando en el centro de masa del sistema.

En este trabajo se entiende por sistema o conjunto al artefacto naval conectado a sus estructuras de fondeo, lo que los hace funcionar acoplados en el plano horizontal.

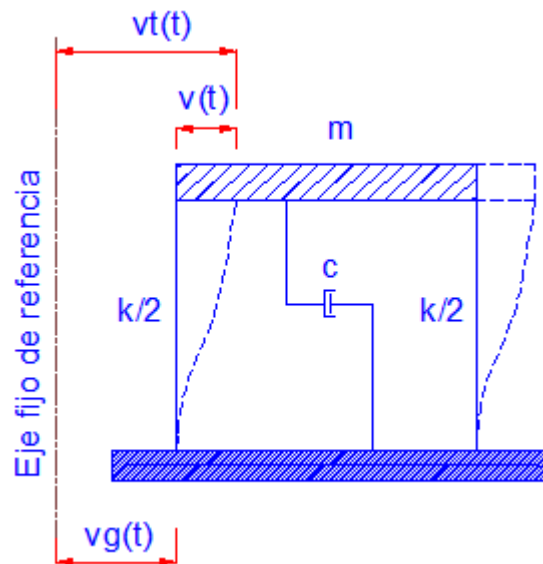


Figura III-1: Definición del problema

La figura muestra una idealización del problema considerando un grado de libertad. En el caso de estudio se tienen tres grados de libertad, correspondientes a dos traslaciones y una rotación en planta. Mediante la rigidez horizontal k y el amortiguamiento c se modelan las propiedades de las obras portuarias de fondeo que están conectados al dique flotante y al suelo de fundación.

Las siguientes definiciones se basan en la figura anterior:

$v^t(t) = (v_x^t(t), v_y^t(t), v_\theta^t(t)) = (v_1^t(t), v_2^t(t), v_3^t(t))$ representa el desplazamiento total de la masa respecto al origen del sistema de coordenadas absoluto [m].

$\underline{v}(t) = (v_x(t), v_y(t), v_\theta(t)) = (v_1(t), v_2(t), v_3(t))$ representa el desplazamiento de la masa del sistema (se asume que toda la masa del sistema se concentra en el artefacto naval) [m].

$\underline{v}_g(t) = (v_{gx}(t), v_{gy}(t), 0) = (v_{g1}(t), v_{g2}(t), 0)$ representa el desplazamiento de la base de la estructura, respecto al origen del sistema de coordenadas absoluto, debido al movimiento horizontal del suelo causado por el sismo [m].

El movimiento total de la masa puede expresarse en términos de la suma del movimiento del suelo y el debido a la distorsión de las columnas.

$$\underline{v}^t(t) = \underline{v}(t) + \underline{v}_g(t) \quad (3-1)$$

La ecuación de movimiento típica es:

$$\underline{m} \cdot \underline{\ddot{v}}^t(t) + \underline{c} \cdot \underline{\dot{v}}^t(t) + \underline{k} \cdot \underline{v}^t(t) = 0 \quad (3-2)$$

Una forma alternativa de la ecuación de movimiento puede ser obtenida utilizando la ecuación (3-1) y expresando la ecuación (3-2) en términos de $\underline{v}^t(t)$ y sus derivadas, en vez de en términos de $\underline{v}(t)$ y sus derivadas, resultando:

$$\underline{m} \cdot \underline{\ddot{v}}^t(t) + \underline{c} \cdot \underline{\dot{v}}^t(t) + \underline{k} \cdot \underline{v}^t(t) = \underline{c} \cdot \underline{\dot{v}}_g(t) + \underline{k} \cdot \underline{v}_g(t) \quad (3-3)$$

Con esta formulación, la carga efectiva mostrada a la derecha de la ecuación depende de la velocidad y desplazamiento del sismo, y la respuesta obtenida al resolver la ecuación es el desplazamiento total de la masa respecto al origen de un sistema de coordenadas absoluto en vez del desplazamiento de la masa relativo a su base (que también se mueve).

III.2. Definición de las propiedades de la estructura

El desafío consiste en considerar la actuación acoplada del dique flotante y sus obras marítimas de fondeo bajo la acción de un sismo. Como ya se ha indicado en el capítulo I, los elementos de fondeo corresponden genéricamente a estructuras portuarias que permiten mantener el artefacto naval en posición de proyecto bajo la acción de los estados de carga identificados previamente, y transmitir los esfuerzos resultantes al suelo de fundación.

Tal como se puede apreciar en la ecuación de movimiento, los coeficientes que acompañan al desplazamiento, velocidad y aceleración de la masa, corresponden a las matrices de rigidez, amortiguamiento y masa del sistema.

La dimensión de estas matrices está relacionada con la cantidad de grados de libertad incluidos en el análisis, por tanto para el caso tridimensional, estas matrices serán de 3x3, asociada a dos grados de libertad horizontales ortogonales entre sí y un giro en planta.

III.2.1. Matriz de masa

La matriz de masa posee la forma siguiente:

$$\underline{m} = \frac{1}{g} \cdot \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

En que las unidades de \underline{m} son $[t \cdot s^2/m]$ para los grados de libertad traslacionales 1 y 2; y $[t \cdot m \cdot s^2]$ para el grado de libertad correspondiente a la rotación en planta.

Adicionalmente:

$$M = M_{DF} + \sum_i^N M_{EF} \quad (3-5)$$

$$I_0 = M_{DF} \cdot \frac{(L^2 + B^2)}{12} \quad (3-6)$$

M_{DF} = masa del dique flotante [t]

M_{EF} = masa de un elemento o estructura de fondeo [t]

N = número de elementos o estructuras de fondeo

L = eslora del dique flotante [m]

B = manga del dique flotante [m]

g = aceleración de gravedad [m/s^2]

El coeficiente de la matriz de masa asociado al grado de libertad rotacional (m_{33}) contiene una expresión simplificada del momento de inercia del dique flotante dividido por la aceleración de gravedad. Dentro de las hipótesis que se asumen al utilizar esta expresión están:

- El dique flotante posee una superficie rectangular en planta.
- Se asume una distribución uniforme de la masa por unidad de superficie del dique flotante.

III.2.2. Matriz de rigidez

En proyectos sencillos, en que los elementos de fondeo correspondan a pilotes aislados, la determinación de la rigidez de los fondeos es relativamente rápida, pues se puede utilizar la expresión de rigidez de una columna en cantiléver:

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (3-7)$$

En que las unidades de k son [t/m], donde:

L = corresponde a la distancia entre el punto de empotramiento del pilote en el suelo y la conexión entre el pilote y el artefacto naval [m]

E = módulo de elasticidad del material de pilote [t/m^2]

I = momento de inercia de la sección transversal del pilote [m^4]

En el caso de proyectos más complejos como el caso de estudio tratado en este documento, el método de rigidez es el procedimiento que permite construir la matriz de rigidez del conjunto.

En la obtención de la matriz de rigidez del conjunto se considera que el dique flotante se encuentra sobre apoyos deslizantes, con los que se idealiza su flotación.

Debido a que para el caso de estudio se cuentan tres grados de libertad actuando en el centro de masa del conjunto, la matriz de rigidez que debe construirse debe ser de 3×3 .

Mediante el siguiente procedimiento, es posible construir la matriz de rigidez de cualquier configuración estructural referida a los tres grados de libertad que actúan en el centro de masa del dique flotante:

- Con apoyo de SAP2000 o cualquier otro software de análisis estructural se construye un modelo tridimensional del conjunto.

- Se calculan las coordenadas del centro de masa del conjunto para un sistema de referencia conocido.
- Se realiza análisis modal y se obtienen los periodos de vibración en las direcciones relacionadas con los grados de libertad del conjunto.
- Se obtiene la matriz Φ de valores propios del conjunto a partir de los desplazamientos medidos en el centro de masa de éste, de cada modo considerado.
- Se conforma la matriz ω_n^2 ya que los periodos de vibración son conocidos pues previamente se ha hecho análisis modal.
- La matriz de rigidez se obtiene mediante la expresión siguiente, basada en la ecuación de valores y vectores propios:

$$\underline{k} = \underline{m} \cdot \underline{\Phi} \cdot \underline{\omega_n^2} \cdot \underline{\Phi}^T \quad (3-8)$$

En que:

\underline{k} = matriz de rigidez del conjunto referida a los tres grados de libertad que actúan en el centro de masa del dique flotante, cuyas unidades corresponden a [t/m] para los grados de libertad traslacionales y [t-m/rad] para el grado de libertad rotacional.

\underline{m} = matriz de masa del conjunto

$\underline{\Phi}$ = matriz de valores propios del conjunto

$\underline{\Phi}^T$ = matriz de valores propios traspuesta del conjunto

$\underline{\omega}_n^2$ = matriz diagonal de los cuadrados de las frecuencias angulares del conjunto
[rad²/s²]

En caso que la matriz \underline{k} obtenida no sea simétrica, se puede forzar su simetría mediante la siguiente expresión:

$$\underline{k}_s = \frac{\underline{k} + \underline{k}^T}{2} \quad (3-9)$$

En que:

\underline{k}^T = matriz de rigidez traspuesta del conjunto referida a los tres grados de libertad que actúan en el centro de masa del dique flotante

\underline{k}_s = matriz de rigidez simétrica del conjunto

III.2.3. Matriz de amortiguamiento

La matriz de amortiguamiento del conjunto es posible construirla una vez se conocen la matriz de masa \underline{m} y la matriz de rigidez \underline{k} de éste. Esta matriz es diagonal, siendo los elementos de la diagonal de la forma siguiente:

$$C_n = \zeta_n \cdot 2 \cdot M_n \cdot \omega_n \quad (3-10)$$

En que:

ζ_n = razón de amortiguamiento del modo n

ω_n = frecuencia angular del modo n [rad/s]

$M_n = \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{m} \cdot \underline{\phi}_n$ en unidades [t-s²/m] para los grados de libertad traslacionales y [t-m-s²] para el giro en planta.

La matriz de amortiguamiento clásico del conjunto es:

$$\underline{c} = (\underline{\Phi}^T)^{-1} \cdot \underline{C} \cdot \underline{\Phi}^{-1} \quad (3-11)$$

Cuyas unidades son [t-s/m] para los grados de libertad traslacionales y [t-m-s] para el giro en planta.

III.3. Input de ecuación de movimiento

Como se muestra en la ecuación 3-3, la excitación o input que se indica en el lado derecho de la igualdad está compuesta por el desplazamiento y la velocidad del suelo, lo que marca una diferencia respecto a análisis sísmico de edificios u otro tipo de estructuras más comunes, en que el input corresponde a la aceleración del suelo.

A partir del registro de aceleración del suelo producido por un sismo, es posible obtener los registros de velocidad y desplazamiento mediante el siguiente algoritmo de integración:

$$v(t_{i+1}) = v_{i+1} = v_i + \frac{1}{2} \cdot \Delta t_i \cdot (a_i + a_{i+1})$$

$$y(t_{i+1}) = y_{i+1} = y_i + v_i \cdot \Delta t_i + \frac{1}{6} \cdot (\Delta t_i)^2 \cdot (2 \cdot a_i + a_{i+1})$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$$

En que:

$v(t)$ = registro de velocidad del suelo

$y(t)$ = registro de desplazamiento del suelo

Se asume que las condiciones iniciales de velocidad y desplazamiento en el instante $t=0$ son iguales a cero.

Como ejemplo de la aplicación de este procedimiento se muestra la velocidad y desplazamiento obtenidos a partir del registro base de aceleración del terremoto del 27 de febrero 2010 medido en Concepción:

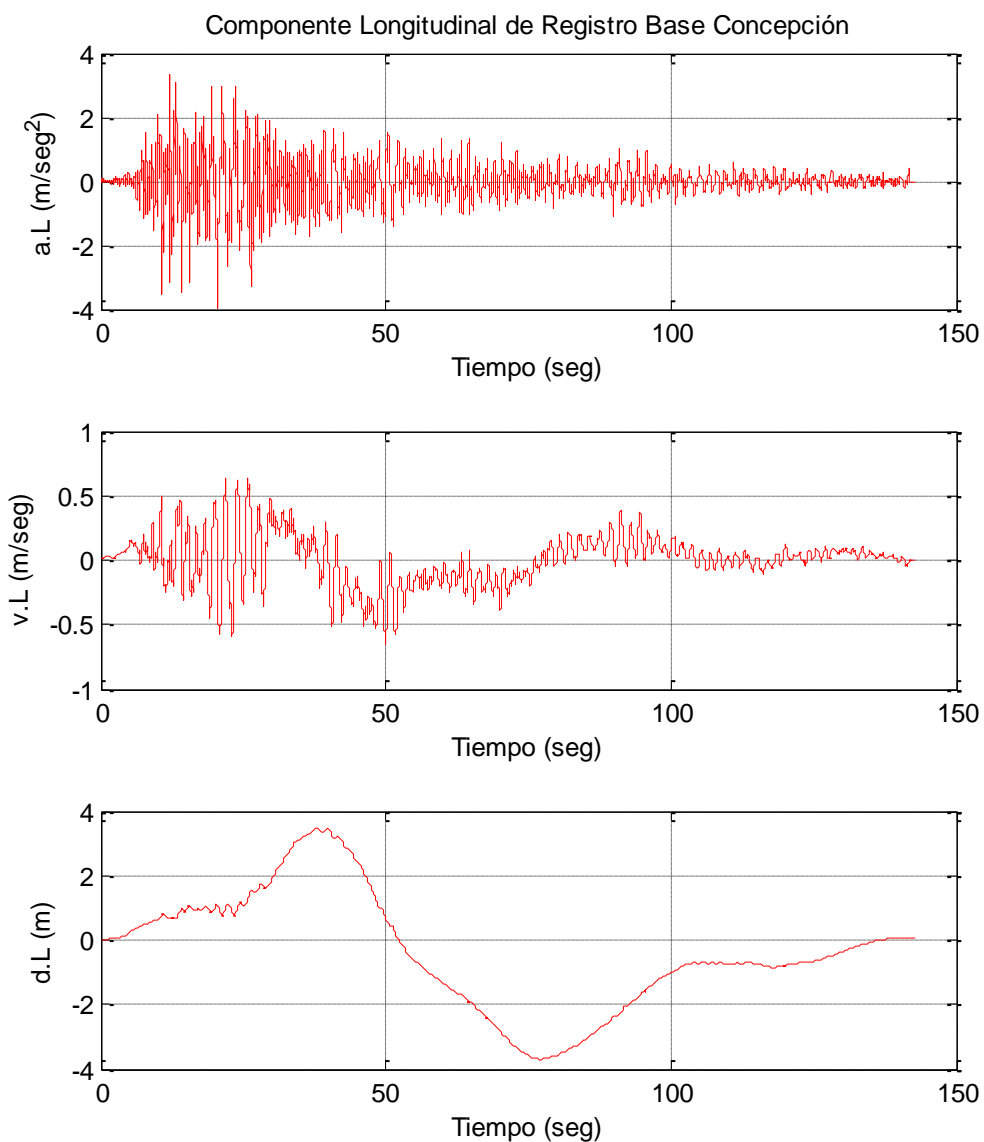


Figura III-2: Registros sísmicos de componente longitudinal - Concepción

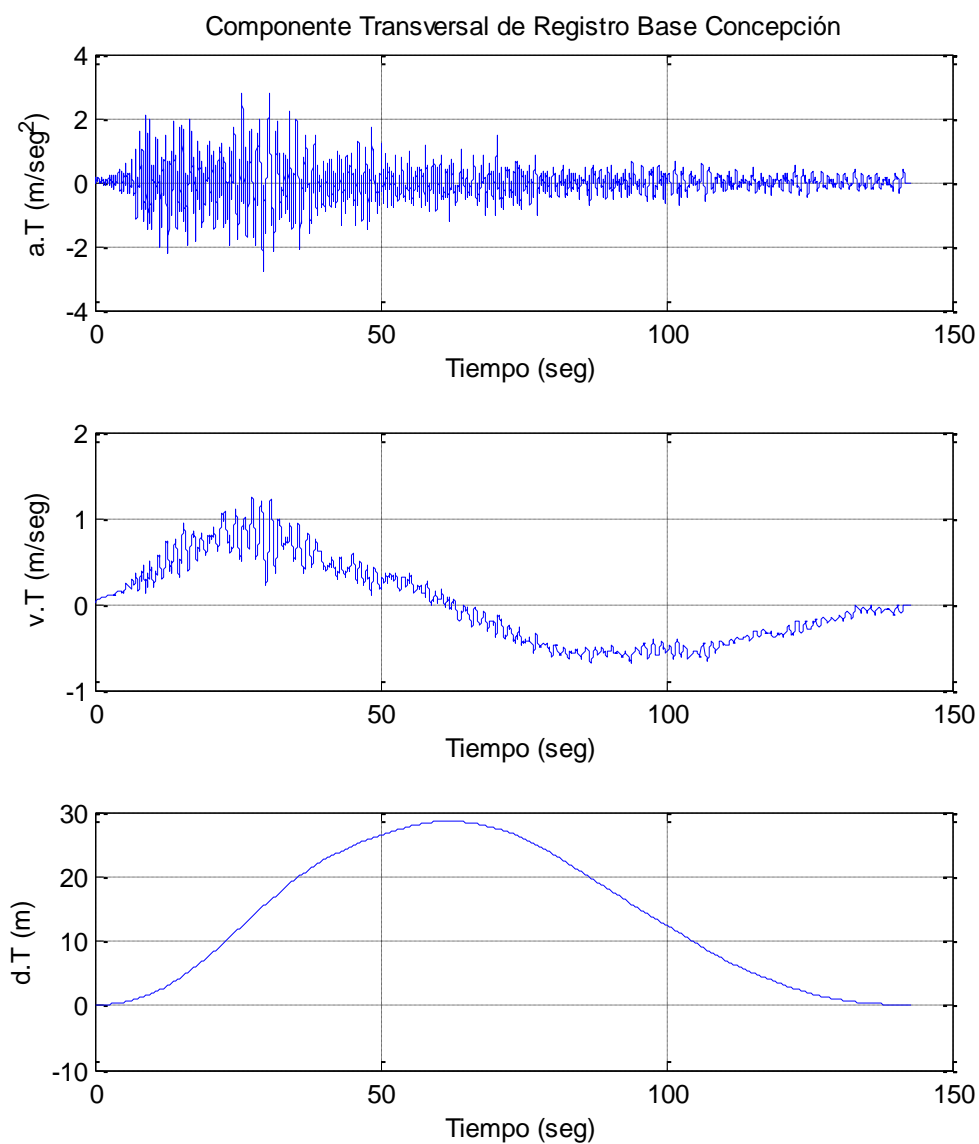


Figura III-3: Registros sísmicos de componente transversal - Concepción

Si se denomina $\underline{p}(t)$ al input extendido a los 3 grados de libertad del problema, se tiene:

$$\underline{p}(t) = \underline{c} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \dot{\underline{v}}_{g1} + \underline{k} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \underline{v}_{g1} + \underline{c} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \dot{\underline{v}}_{g2} + \underline{k} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \underline{v}_{g2} \quad (3-12)$$

En que:

$\dot{\underline{v}}_{g1}$ = velocidad del suelo de una de las componentes (longitudinal o transversal) del registro sísmico [m/s]

$\dot{\underline{v}}_{g2}$ = velocidad del suelo de la componente ortogonal a la dirección 1 del registro sísmico [m/s]

\underline{v}_{g1} = desplazamiento del suelo de una de las componentes (longitudinal o transversal) del registro sísmico [m]

\underline{v}_{g2} = desplazamiento del suelo de la componente ortogonal a la dirección 1 del registro sísmico [m]

III.4. Análisis modal

A partir de la combinación de las ecuaciones (3-3) y (3-12), mediante análisis modal se obtiene una expresión que permite obtener la solución del problema considerando los tres grados de libertad del sistema.

$$\underline{m} \cdot \ddot{\underline{v}}^t + \underline{c} \cdot \dot{\underline{v}}^t + \underline{k} \cdot \underline{v}^t = \underline{p}(t) \quad (3-13)$$

$$\underline{v}^t(t) = \underline{\Phi} \cdot \underline{q}(t) = \sum_{r=1}^N \underline{\phi}_r \cdot q_r(t) \quad (3-14)$$

La expresión para el desplazamiento total indicado en la ecuación (3-14) se reemplaza en la ecuación (3-13) y se pre multiplica toda la ecuación por $\underline{\phi}_n^T$.

$$\sum_{r=1}^N \underline{m} \cdot \underline{\phi}_r \cdot \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \underline{c} \cdot \underline{\phi}_r \cdot \dot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \underline{k} \cdot \underline{\phi}_r \cdot q_r(t) = \underline{p}(t)$$

$$\sum_{r=1}^N \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{m} \cdot \underline{\phi}_r \cdot \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{c} \cdot \underline{\phi}_r \cdot \dot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{k} \cdot \underline{\phi}_r \cdot q_r(t) = \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{p}(t)$$

$$\underline{\phi}_n^T \cdot \underline{m} \cdot \underline{\phi}_n \cdot \ddot{q}_n(t) + \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{c} \cdot \underline{\phi}_n \cdot \dot{q}_n(t) + \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{k} \cdot \underline{\phi}_n \cdot q_n(t) = \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{p}(t)$$

$$\underline{M}_n \cdot \ddot{q}_n(t) + \underline{C}_n \cdot \dot{q}_n(t) + \underline{K}_n \cdot q_n(t) = \underline{\phi}_n^T \cdot \underline{p}(t)$$

$$\ddot{q}_n(t) + 2 \cdot \underline{\zeta}_n \cdot \omega_n \cdot \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 \cdot q_n(t) = \frac{\underline{\phi}_n^T}{\underline{M}_n} \cdot \underline{p}(t) \quad (3-15)$$

$$\frac{\underline{\phi}_n^T}{\underline{M}_n} \cdot \underline{p}(t) = \underline{\phi}_n^T \cdot \left[\frac{\underline{c}}{\underline{M}_n} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \dot{v}_{g1} + \frac{\underline{k}}{\underline{M}_n} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_{g1} + \frac{\underline{c}}{\underline{M}_n} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \dot{v}_{g2} + \frac{\underline{k}}{\underline{M}_n} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_{g2} \right] \quad (3-16)$$

La expresión que se obtiene de combinar las ecuaciones (3-15) y (3-16) corresponde a la ecuación de movimiento que permite calcular la respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración en el centro de masa del artefacto naval referida a un sistema de coordenadas absoluto.

IV. DISEÑO A NIVEL CONCEPTUAL

En este capítulo se realiza el diseño a nivel de ingeniería conceptual de las obras marítimas de fondeo que requiere el dique flotante (DF) para funcionar, bajo las condiciones meta-oceánicas y demás estados de carga definidos. Las estructuras de fondeo consideradas corresponden a dolphins.

La obtención de la respuesta sísmica del conjunto formado por el dique flotante y sus dolphins se obtiene siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo III del presente documento.

Preliminarmente se espera obtener como resultado dolphins convencionales, es decir, que no incluyen aisladores elastoméricos. Posteriormente, se realiza proceso de optimización incorporando al pre diseño aisladores elastoméricos, siendo el objetivo analizar si con este sistema de protección sísmica es posible reducir el número de pilotes requeridos y/o la cantidad total de acero de pilotes involucrada en la solución.

IV.1. Dimensionamiento de dolphins convencionales – Pre diseño

En este apartado se describe el análisis realizado para determinar la distribución en planta de los dolphins requeridos para fondear el dique flotante y la cantidad y geometría de los pilotes que cada dolphin requiere.

IV.1.1. Estados de carga

Las condiciones de operación del proyecto incluyen los siguientes estados de carga:

Tabla IV-I: Estados de carga del proyecto

a. Peso propio y cargas permanentes (D):				
Se cuenta el peso propio de elementos de hormigón armado y acero				
$\gamma_c =$	2.50	tonf/m ³		
$\gamma_s =$	7.85	tonf/m ³		
b. Sobrecarga de uso (L_U):				
Corresponde a la sobrecarga vertical actuando en la plataforma de dolphins				
$L_U =$	0.50	tonf/m ²		
c. Estados de carga de condiciones meta-oceánicas				
Se indican los valores de las cargas en dirección paralela a la eslora del DF, correspondiente a la dirección X, y la dirección paralela a la manga del DF, que corresponde a la dirección Y				
			Dirección X (t)	Dirección Y (t)
Carga de corriente sobre el DF (C_s)			0	71
Carga de viento sobre el DF (W_s)			78	823
Carga de oleaje sobre el DF (W_{sa})			22	49
En el caso del viento, a las cargas ya indicadas se suma un momento torsor en planta igual a 22,123 t-m				
d. Carga de variación de temperatura (T)				
Se considera una variación de temperatura de 15°C				
e. Carga sísmica (E_Q)				
Se utiliza el registro sísmico de Concepción del terremoto del 27 de Febrero 2010				

IV.1.2. Descripción de las estructuras de fondeo

La distribución en planta de los dolphins utilizados para fondear el dique flotante se muestra en la figura VI-1, en la cual las dimensiones se muestran en milímetros.

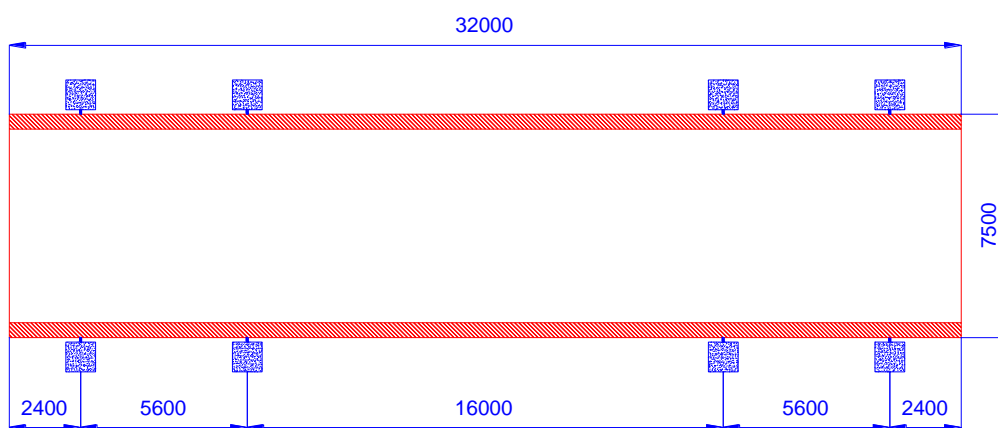


Figura IV-1: Distribución en planta de dolphins

Cada uno de los 8 dolphins del layout del proyecto posee una plataforma de hormigón armado de 12x12 metros y 25 cm de espesor, cuyo nivel superior está a la elevación +3.5 m NRS. Esta plataforma se apoya en vigas IN100x280 y pilotes hincados de ϕ 1200 mm, de espesores de pared de 20 y 26 mm.

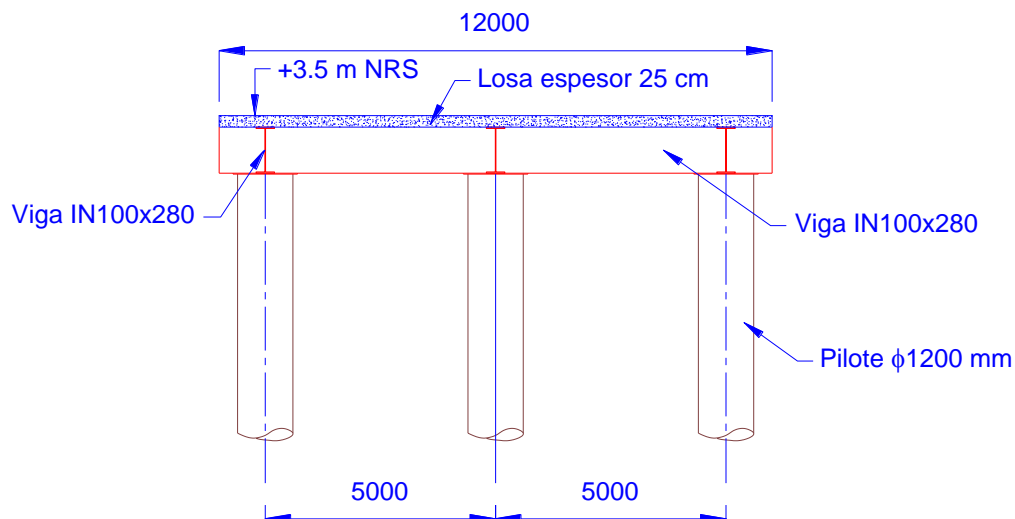


Figura IV-2: Sección transversal del dolphin típico

El nivel de dragado del proyecto, corresponde a la cota -22 m NRS.

Se asume como hipótesis que los pilotes quedan empotrados bajo el fondeo marino a una profundidad de 6 veces su diámetro aproximadamente.

La longitud de los pilotes, comprendida entre el nivel inferior de las vigas IN 100x280 y su punto de empotramiento bajo el fondo marino, es igual a 31 metros.

IV.1.3. Matriz de masa del conjunto DF - dolphins

La masa del conjunto está compuesta por el desplazamiento del dique flotante y la suma de las masas de los dolphins.

Debido a que el desplazamiento del dique flotante es variable y depende de su condición de carga, se estiman dos masas totales que se asocian a las condiciones de vacío y cargado.

Tabla IV-II: Masa del conjunto

Condición del DF	Δ [t]	Σ Dolphins [t]	M [t]	I_0 [t-m ²]
Vacío	73,488	2,472	75,960	661,545,100
Cargado	133,488	2,472	135,960	1,201,670,100

$$m_{\text{Vacío}} = \begin{bmatrix} 75,960 & 0 & 0 \\ 0 & 75,960 & 0 \\ 0 & 0 & 661,545,100 \end{bmatrix}$$

$$m_{\text{Cargado}} = \begin{bmatrix} 135,960 & 0 & 0 \\ 0 & 135,960 & 0 \\ 0 & 0 & 1,201,670,100 \end{bmatrix}$$

IV.1.4. Matriz de rigidez del conjunto DF - dolphins

Con apoyo de SAP2000 V15.1.0 se prepara modelo 3D del conjunto, utilizando para ellos elementos tipo FRAME para vigas y pilotes, y elementos tipo AREA para la losa de hormigón armado de los dolphins y el dique flotante.

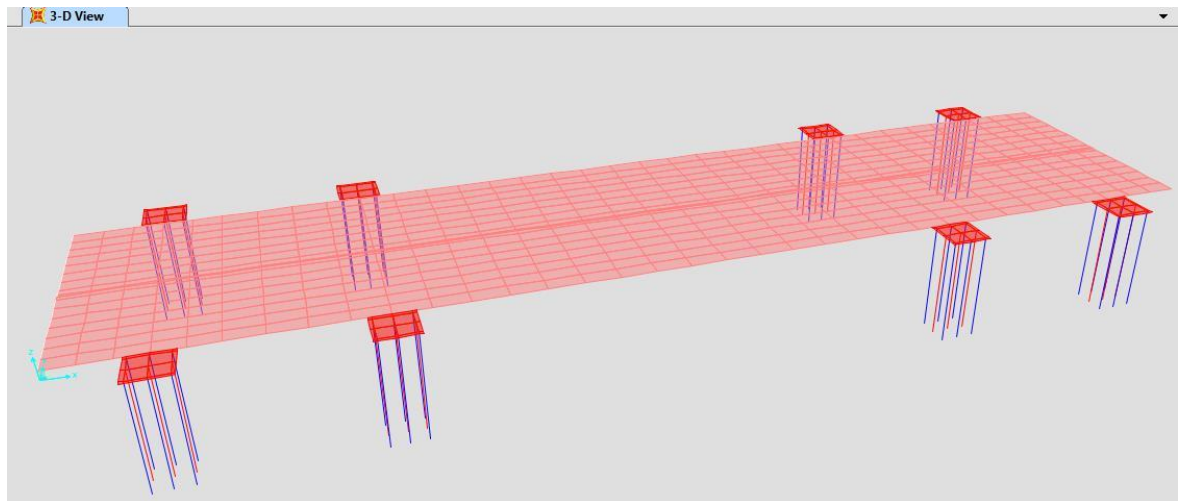


Figura IV-3: Modelo 3D del conjunto dique flotante - dolphins

Se asume como hipótesis que la conexión entre los dolphins y el dique flotante es de tipo Body, lo que quiere decir que los nodos restringidos se mueven juntos como si formaran parte de un cuerpo tridimensional. En esta condición no es posible que existan desplazamientos relativos entre nodos que cuentan con este tipo de restricción.

Se realiza análisis modal y se obtienen los desplazamientos del nodo ubicado en el centro de masa del conjunto. Los desplazamientos que interesan son los relacionados con los grados de libertad indicados en la figura IV-1. Estos desplazamientos permiten construir la matriz Φ de valores propios asociados al conjunto.

Con los periodos calculados en el análisis modal se conforma la matriz ω_n^2 .

Tabla IV-III: Períodos y factores de participación modal dique flotante vacío

Modo	Periodo [s]	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	7.305994	0.999844	1.875E-15	0	1.018E-16	0.003214	0.038845
2	7.055551	1.875E-15	0.999999	0	0.054319	6.026E-18	0.708004
3	5.658846	0.000000116	5.311E-17	0	2.885E-18	3.728E-10	0.253127

$$T_n = \begin{bmatrix} 7.31 & 0 & 0 \\ 0 & 7.06 & 0 \\ 0 & 0 & 5.65 \end{bmatrix}; \omega_n = \begin{bmatrix} 0.86 & 0 & 0 \\ 0 & 0.89 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1121 \end{bmatrix}$$

Tabla IV-IV: Desplazamientos centro de masa de dique flotante vacío

Nodo	Modo	U1 [m]	U2 [m]	U3 [m]	R1 [rad]	R2 [rad]	R3 [rad]
4873	1	-0.011427	4.941E-10	0	0	0	-2.439E-08
4873	2	-4.948E-10	-0.011412	0	0	0	8.687E-13
4873	3	-0.000003891	8.317E-11	0	0	0	0.000119

$$\Phi = \begin{bmatrix} -0.011427 & 0.0000000004941 & -0.00000002439 \\ -0.0000000004948 & -0.011412 & 0.000000000008687 \\ -0.000003891 & 0.00000000008317 & 0.000119 \end{bmatrix}$$

Mediante la ecuación (3-8) se obtiene la matriz de rigidez del conjunto considerando el dique flotante vacío.

$$k_{Vacio} = \begin{bmatrix} 5720.5917 & -0.00001786 & -5909.19293 \\ -0.00001786 & 6132.90565 & 0.11269783 \\ -5909.19293 & 0.11269783 & 86202886.1 \end{bmatrix}$$

Tabla IV-V: Períodos y factores de participación modal de dique flotante cargado

Modo	Periodo [s]	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
9.798933	0.999911	1.813E-15	0	9.798933	1.311E-16	0.003849	0.03891
9.457483	1.813E-15	1	0	9.457483	0.072343	6.979E-18	0.70913
7.562928	1.166E-07	3.245E-17	0	7.562928	2.348E-18	4.49E-10	0.251946

$$T_n = \begin{bmatrix} 9.799 & 0 & 0 \\ 0 & 9.46 & 0 \\ 0 & 0 & 7.56 \end{bmatrix}; \omega_n = \begin{bmatrix} 0.6412 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6642 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8311 \end{bmatrix}$$

Tabla IV-VI: Desplazamientos centro de masa de dique flotante cargado

Nodo	Modo	U1 [m]	U2 [m]	U3 [m]	R1 [rad]	R2 [rad]	R3 [rad]
4873	1	0.00852	-3.625E-10	0	0	0	1.817E-08
4873	2	3.628E-10	0.008513	0	0	0	-5.079E-13
4873	3	0.00000291	-4.85E-11	0	0	0	-0.000089

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.00852 & -0.0000000003625 & 0.00000001817 \\ 0.0000000003628 & 0.008513 & -0.000000000005079 \\ 0.00000291 & -0.0000000000485 & -0.000089 \end{bmatrix}$$

Al igual que en el caso del dique flotante vacío, mediante la ecuación (3-8) se obtiene la matriz de rigidez del conjunto considerando el dique flotante cargado.

$$k_{Cargado} = \begin{bmatrix} 5698.20921 & -0.000017707 & -5957.56527 \\ -0.000017707 & 6113.91804 & 0.08846389 \\ -5957.56527 & 0.08846389 & 86178972.3 \end{bmatrix}$$

De acuerdo al resultado obtenido, las matrices de rigidez del conjunto considerando las condiciones de dique flotante vacío y cargado poseen coeficientes similares.

IV.1.5. Matriz de amortiguamiento conjunto DF - dolphins

Una vez que ya se conocen las matrices de masa y rigidez del conjunto, se puede construir la matriz de amortiguamiento del conjunto. Se considera una razón de amortiguamiento del 5% para todos los grados de libertad.

Las matrices de amortiguamiento del conjunto considerando las condiciones de dique flotante vacío y cargado son las siguientes:

$$C_{n-Vacio} = \begin{bmatrix} 0.0859457 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0889969 & 0 \\ 0 & 0 & 0.11121266 \end{bmatrix}$$

$$c_{Vacio} = \begin{bmatrix} 665.54 & -0.0000008825 & -299.72 \\ -0.0000008825 & 689.11 & 0.005629 \\ -299.72 & 0.005629 & 7751530.668 \end{bmatrix}$$

$$C_{n-Cargado} = \begin{bmatrix} 0.064115 & 0 & 0 \\ 0 & 0.066418 & 0 \\ 0 & 0 & 0.083115 \end{bmatrix}$$

$$c_{Cargado} = \begin{bmatrix} 888.66 & -0.0000012095 & -404.64 \\ -0.0000012095 & 920.52 & 0.0059159 \\ -404.64 & 0.0059159 & 10369081.0069 \end{bmatrix}$$

IV.1.6. Análisis sísmico del conjunto DF – dolphins

El objetivo del análisis sísmico es encontrar la respuesta del conjunto en términos de los desplazamientos y corte basal ante el registro de aceleraciones del terremoto del 27 de Febrero 2010 medido en Concepción. Este análisis se realiza para las condiciones del dique flotante vacío y cargado, y considerando los registros sísmicos base y corregido por el procedimiento de corrección de línea base parabólica.

En el Anexo A se presenta el algoritmo en código Matlab utilizado para resolver la ecuación de movimiento, es decir, la ecuación (3-3).

a) Respuestas del conjunto ante registro sísmico base y DF cargado

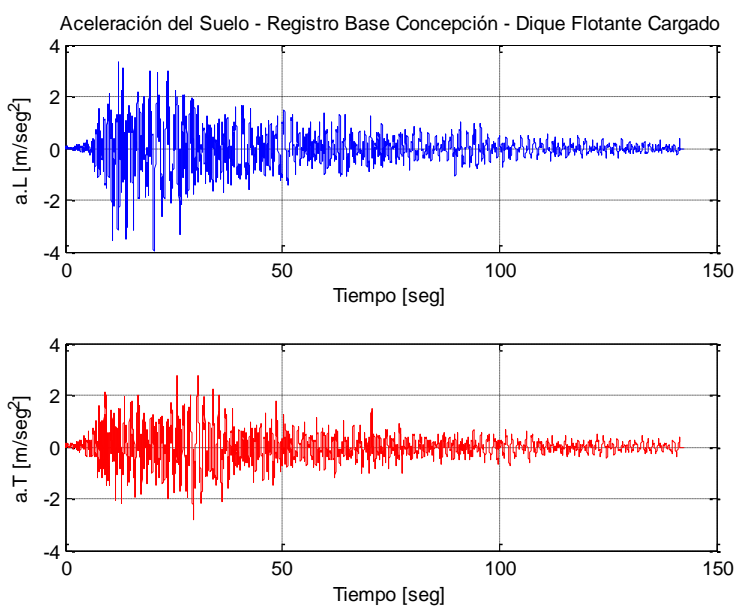


Figura IV-4: Registro de aceleraciones utilizado en el análisis

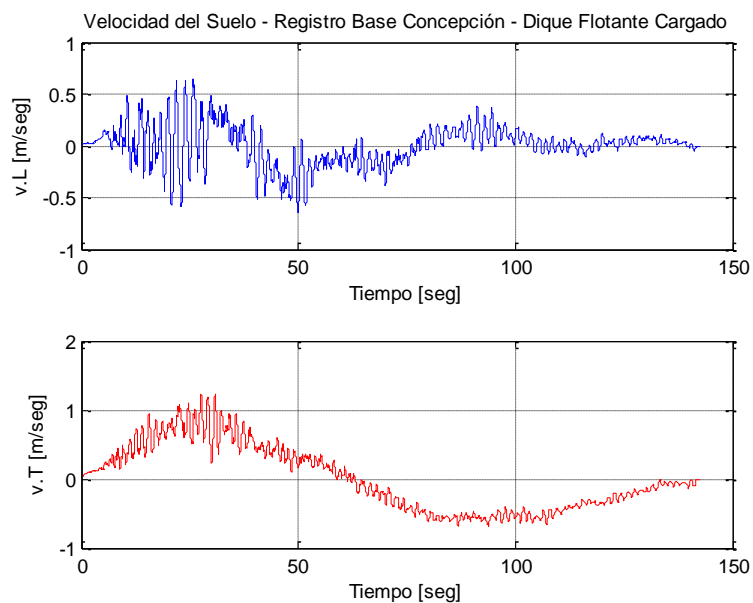


Figura IV-5: Velocidad del suelo obtenida a partir del registro de aceleraciones

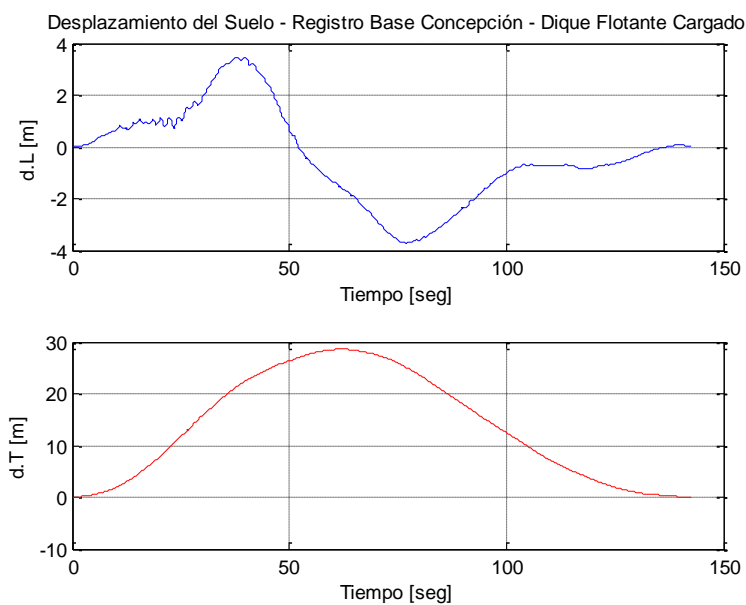


Figura IV-6: Desplazamiento del suelo obtenido a partir del registro de aceleraciones

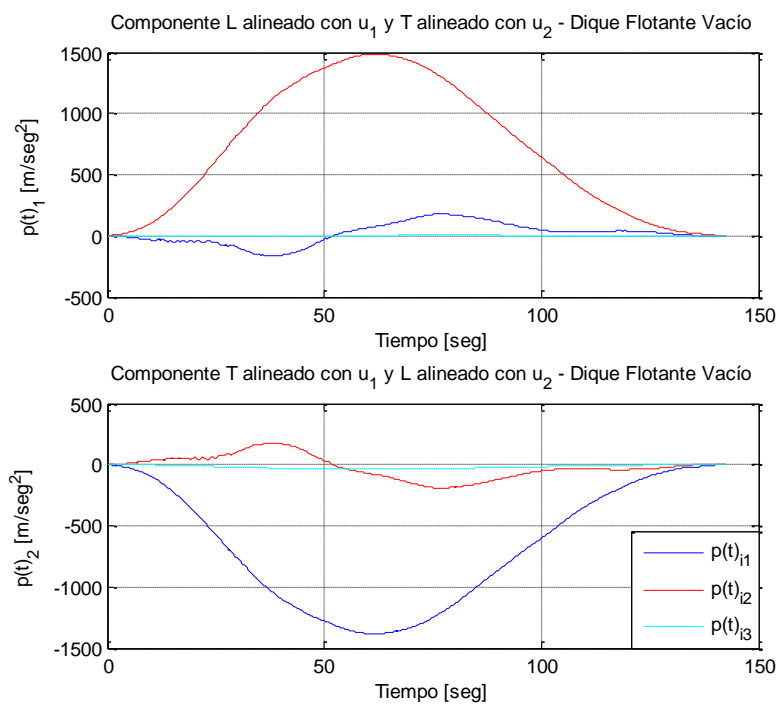


Figura IV-7: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)

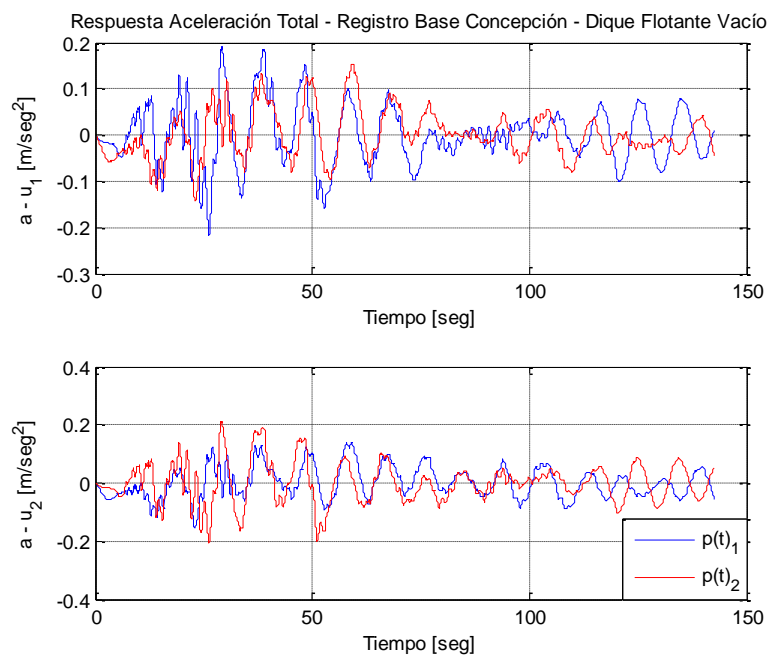


Figura IV-8: Aceleración total de dique flotante cargado

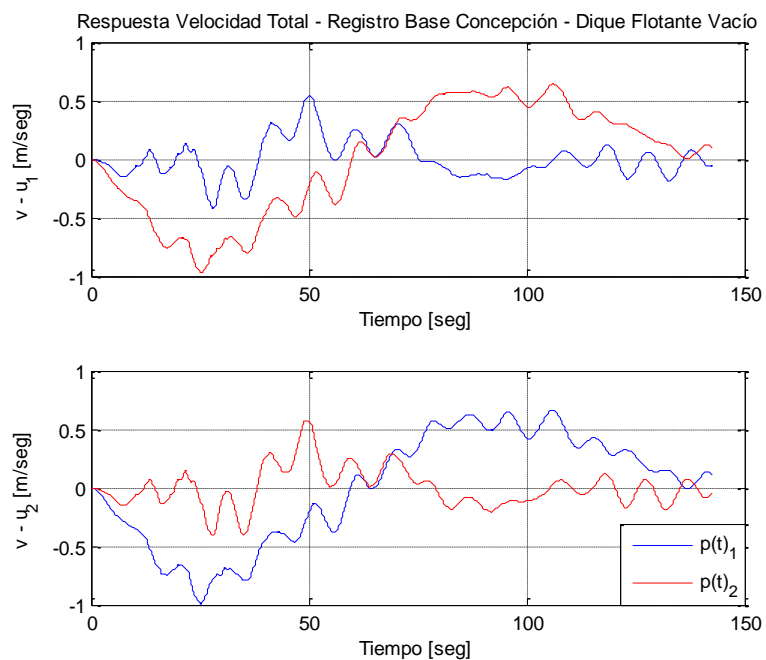


Figura IV-9: Velocidad total de dique flotante cargado

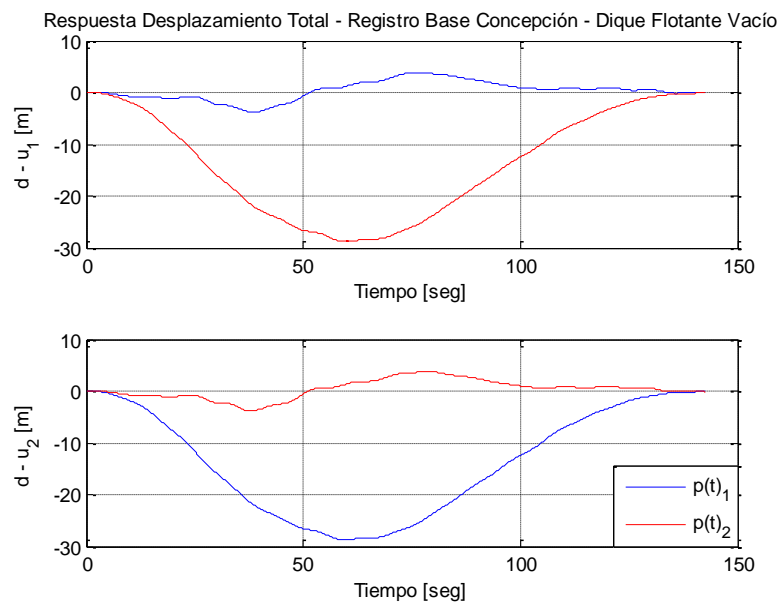


Figura IV-10: Desplazamiento total de dique flotante cargado

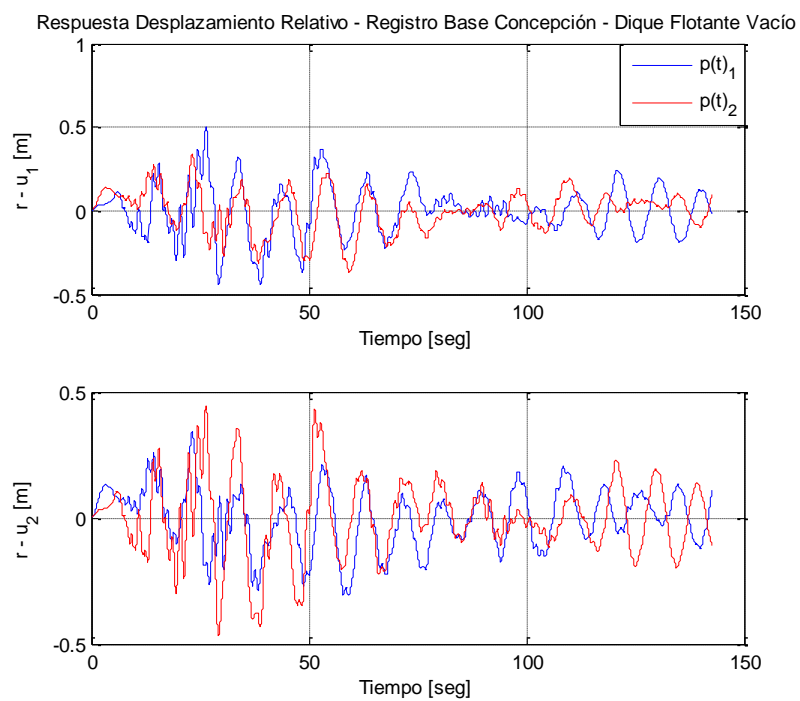


Figura IV-11: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado

Tabla IV-VII: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado

r	p(t)	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2 + u_2^2)$
max(u_1)	1	0.501	-0.175	0.000037	0.531
max(u_2)	1	-0.069	0.341	0.000012	0.348
max(u_3)	1	0.151	0.042	0.000073	0.156
min(u_1)	1	-0.445	-0.193	-0.000098	0.485
min(u_2)	1	-0.214	-0.308	-0.000025	0.375
min(u_3)	1	-0.428	-0.168	-0.000099	0.460
max(u_1)	2	0.338	-0.049	0.000022	0.341
max(u_2)	2	-0.127	0.445	0.000014	0.463
max(u_3)	2	0.179	-0.004	0.000058	0.179
min(u_1)	2	-0.372	-0.037	-0.000073	0.374
min(u_2)	2	-0.022	-0.470	-0.000051	0.471
min(u_3)	2	-0.362	-0.025	-0.000074	0.363

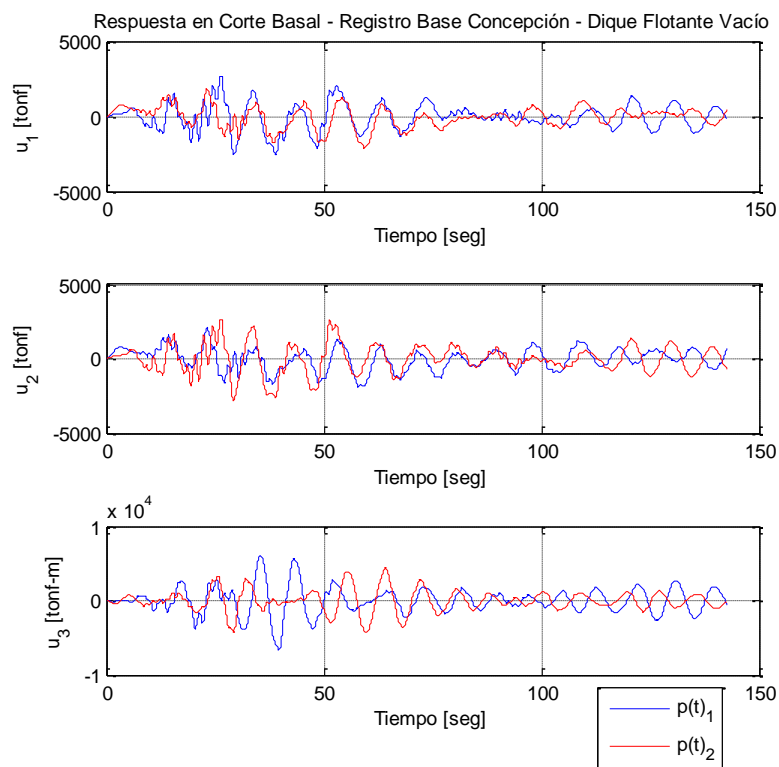


Figura IV-12: Corte basal con dique flotante cargado

Tabla IV-VIII: Corte basal máximo de dique flotante cargado

Vo	p(t)	u_1 [t]	u_2 [t]	u_3 [t-m]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	2856	-1072	182	3051
max(u_2)	1	-391	2087	1450	2123
max(u_3)	1	103	-182	5992	210
min(u_1)	1	-2535	217	1053	2545
min(u_2)	1	-1218	-1885	-899	2244
min(u_3)	1	-1405	-655	-6585	1550
max(u_1)	2	1924	-303	-151	1948
max(u_2)	2	-724	2720	2005	2815
max(u_3)	2	484	193	4430	521
min(u_1)	2	-2122	-226	-4077	2134
min(u_2)	2	-127	-2875	-4235	2877
min(u_3)	2	118	-2825	-4322	2827

b) Respuestas del conjunto ante registro sísmico base y DF vacío

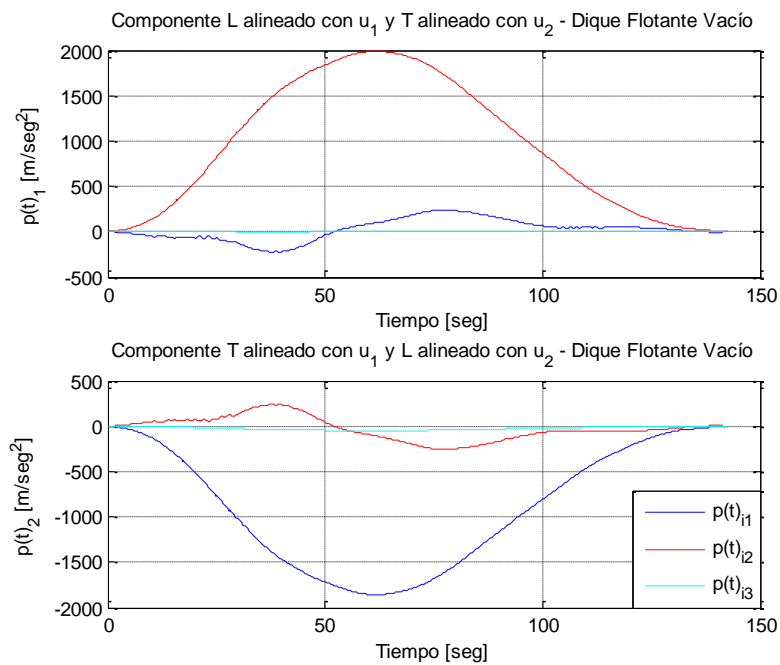


Figura IV-13: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)

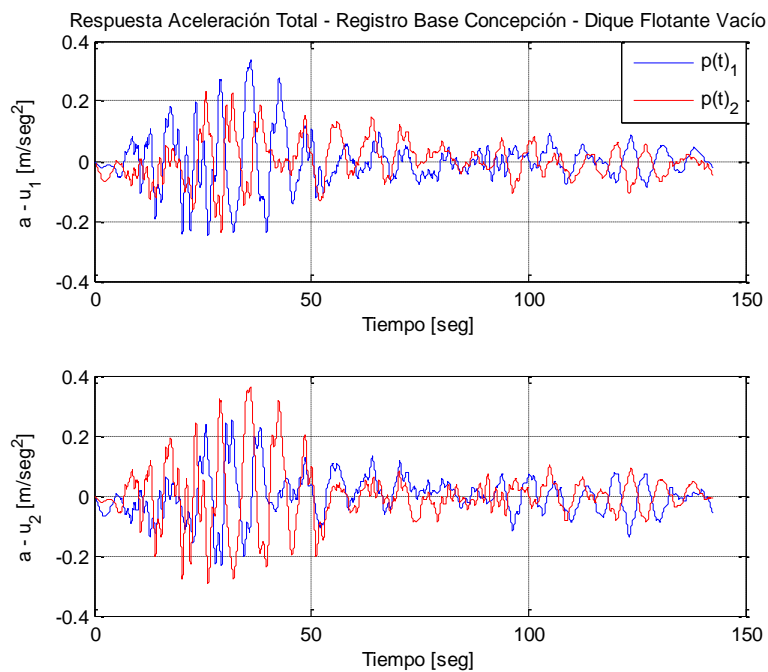


Figura IV-14: Aceleración total de dique flotante vacío

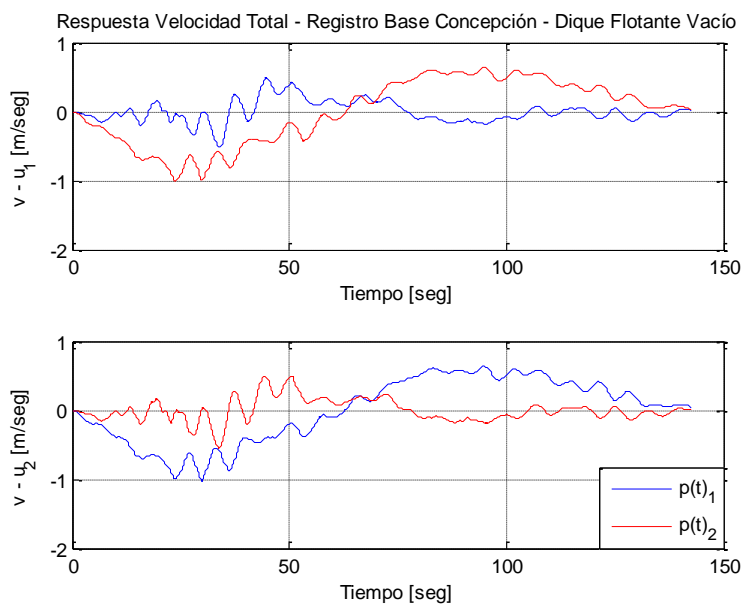


Figura IV-15: Velocidad total de dique flotante vacío

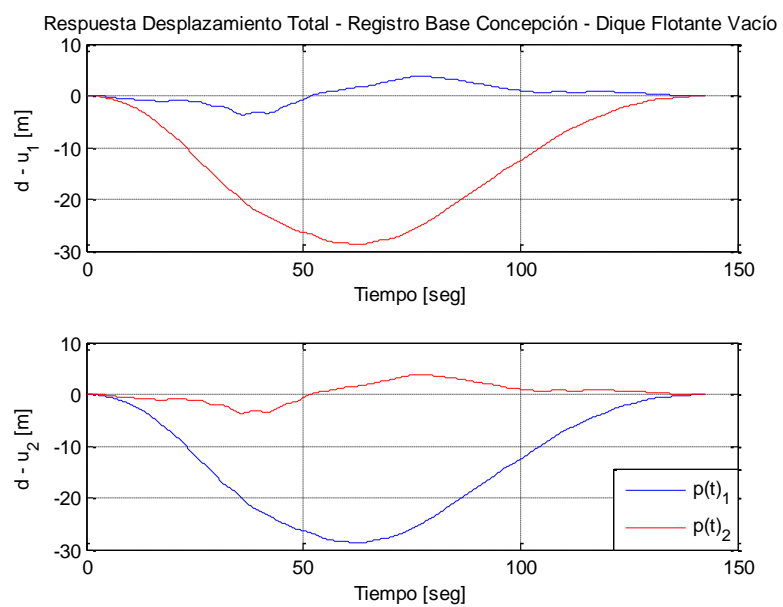


Figura IV-16: Desplazamiento total de dique flotante vacío

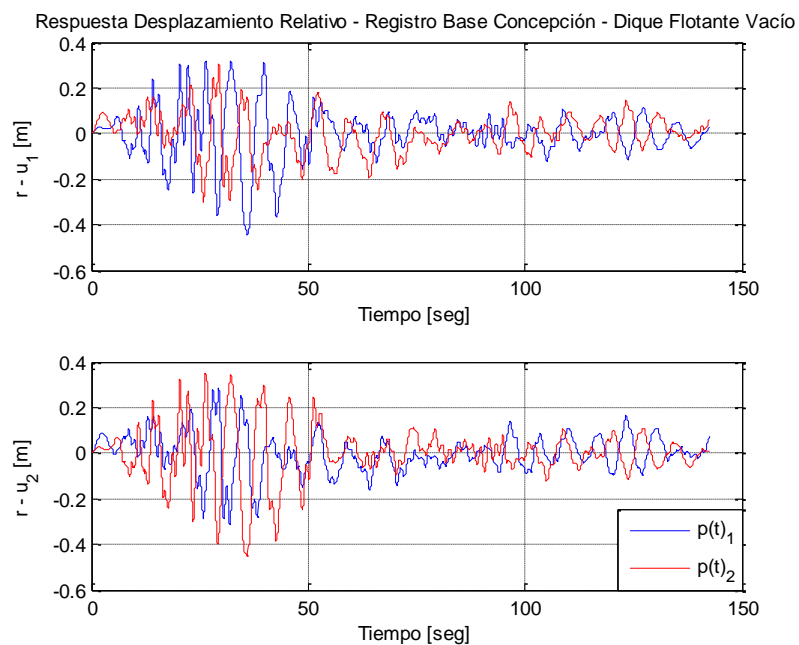


Figura IV-17: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío

Tabla IV-IX: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío

r	p(t)	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2 + u_2^2)$
max(u_1)	1	0.319	-0.241	0.000023	0.400
max(u_2)	1	-0.333	0.282	-0.000011	0.437
max(u_3)	1	0.287	-0.024	0.000117	0.288
min(u_1)	1	-0.448	0.115	-0.000110	0.463
min(u_2)	1	0.288	-0.314	-0.000006	0.426
min(u_3)	1	-0.368	-0.088	-0.000124	0.378
max(u_1)	2	0.303	-0.360	0.000038	0.471
max(u_2)	2	-0.167	0.354	-0.000022	0.391
max(u_3)	2	0.161	-0.442	0.000068	0.470
min(u_1)	2	-0.298	0.140	-0.000014	0.329
min(u_2)	2	0.148	-0.450	0.000067	0.474
min(u_3)	2	-0.173	0.211	-0.000077	0.273

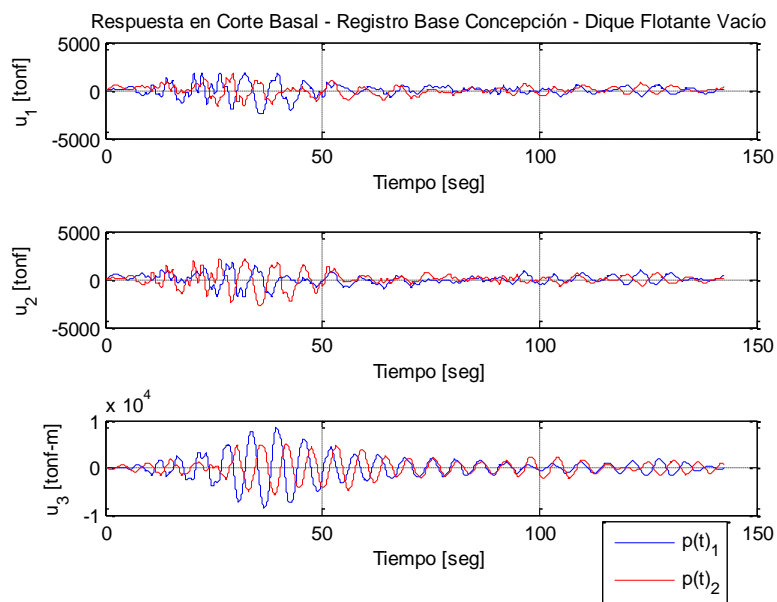


Figura IV-18: Corte basal con dique flotante vacío

Tabla IV-X: Corte basal máximo de dique flotante vacío

Vo	p(t)	u_1 [t]	u_2 [t]	u_3 [t-m]	$\text{sqrt}(u_1^2 + u_2^2)$
max(u_1)	1	1826	-1478	133	2349
max(u_2)	1	-1904	1732	1028	2574
max(u_3)	1	1349	-380	8478	1401
min(u_1)	1	-2565	706	-6808	2660
min(u_2)	1	1650	-1923	-2195	2534
min(u_3)	1	-1957	-905	-8598	2156
max(u_1)	2	1736	-2207	1446	2808
max(u_2)	2	-957	2168	-906	2370
max(u_3)	2	88	-1331	5037	1334
min(u_1)	2	-1705	859	512	1910
min(u_2)	2	845	-2761	4862	2887
min(u_3)	2	-876	1236	-5665	1515

c) Respuestas del conjunto ante registro sísmico corregido y DF cargado

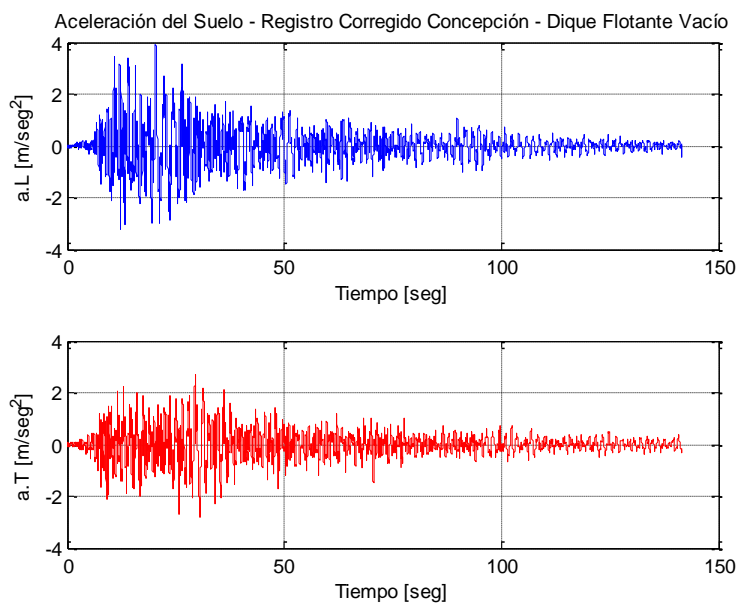


Figura IV-19: Registro de aceleraciones utilizado en el análisis

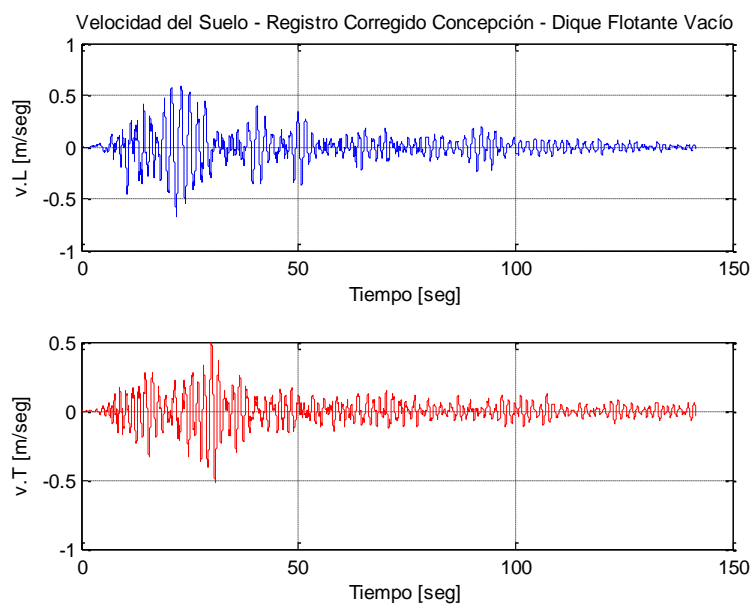


Figura IV-20: Velocidad del suelo obtenida de registro de aceleraciones

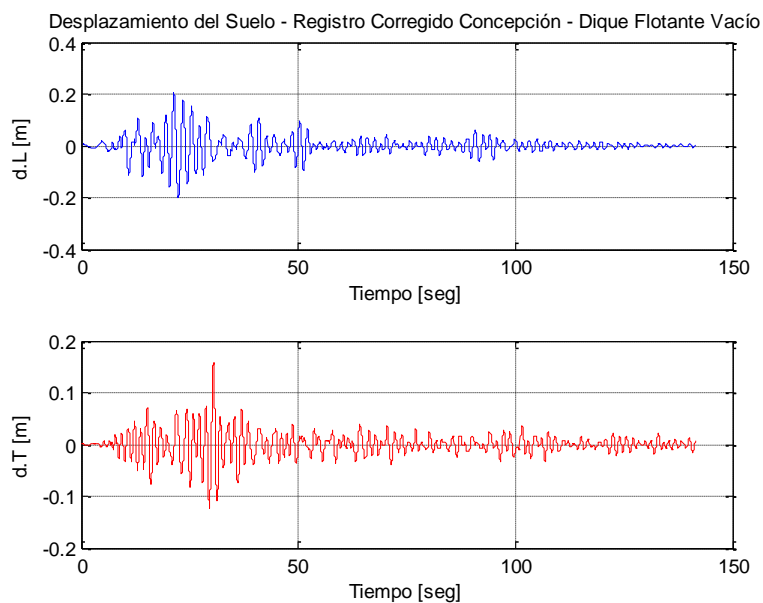


Figura IV-21: Desplazamiento del suelo obtenido a partir de registro de aceleraciones

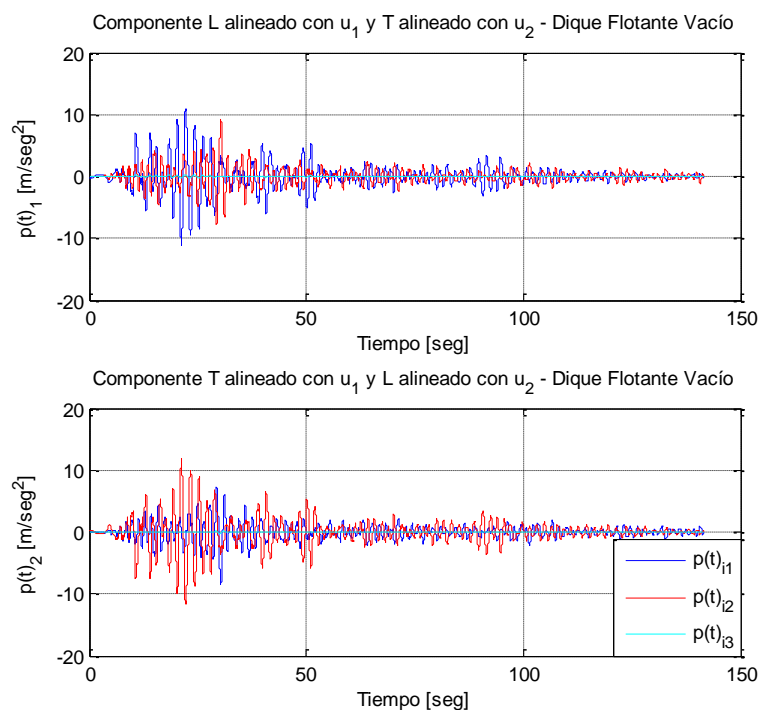


Figura IV-22: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)

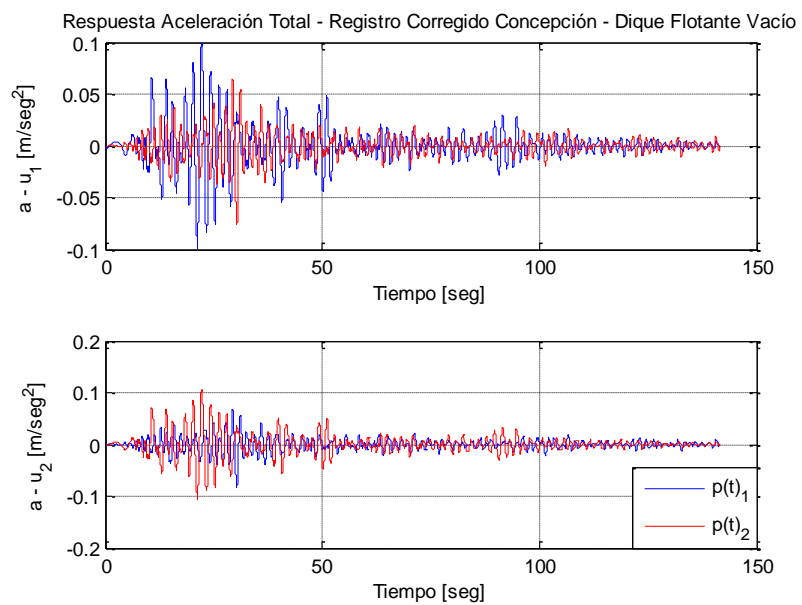


Figura IV-23: Aceleración total de dique flotante cargado

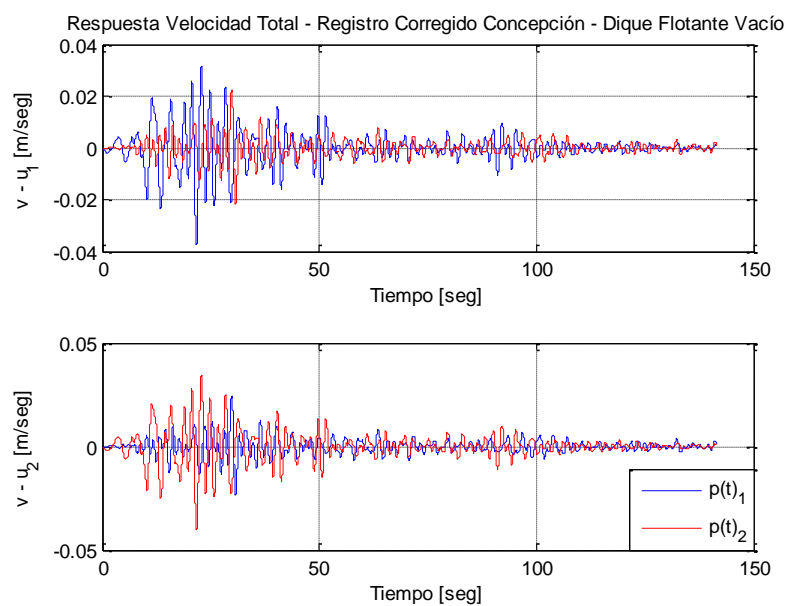


Figura IV-24: Velocidad total de dique flotante cargado

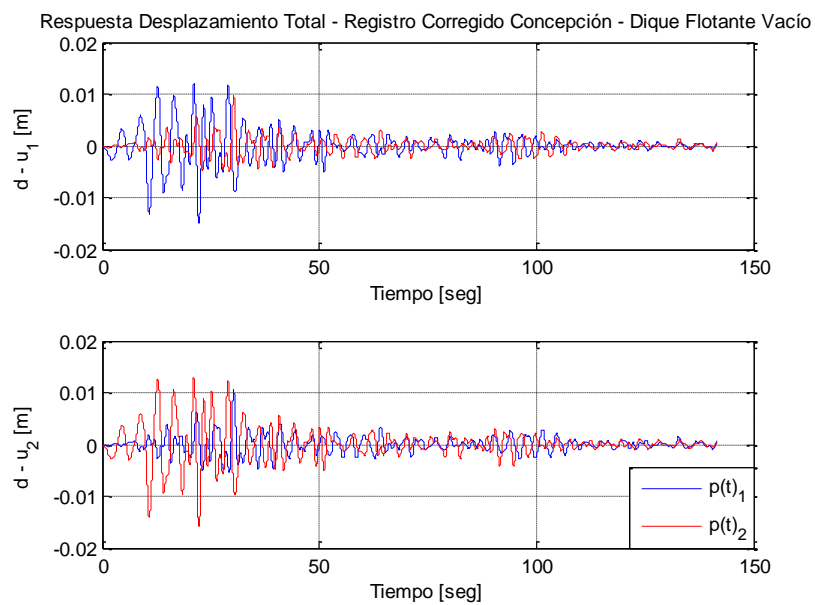


Figura IV-25: Desplazamiento total de dique flotante cargado

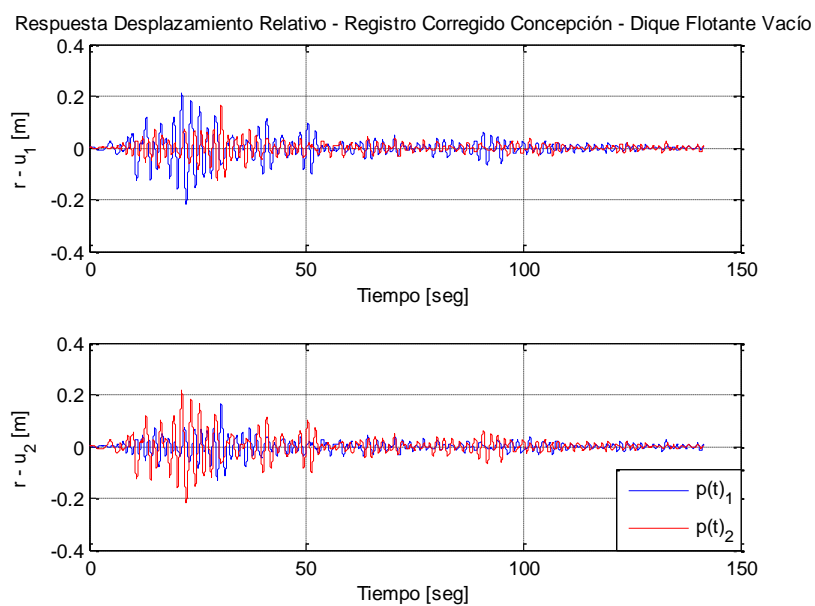


Figura IV-26: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado

Tabla IV-XI: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado

r	p(t)	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	0.214	-0.012	-0.00000163	0.215
max(u_2)	1	-0.068	0.166	0.00000113	0.180
max(u_3)	1	-0.217	0.036	0.00000181	0.220
min(u_1)	1	-0.217	0.038	0.00000181	0.220
min(u_2)	1	0.076	-0.128	-0.00000116	0.149
min(u_3)	1	0.070	-0.042	-0.00000214	0.082
max(u_1)	2	0.165	-0.069	-0.00000127	0.179
max(u_2)	2	-0.012	0.215	-0.00000046	0.215
max(u_3)	2	-0.062	0.126	0.00000070	0.141
min(u_1)	2	-0.127	0.076	0.00000045	0.148
min(u_2)	2	0.037	-0.218	-0.00000033	0.221
min(u_3)	2	0.157	-0.065	-0.00000131	0.170

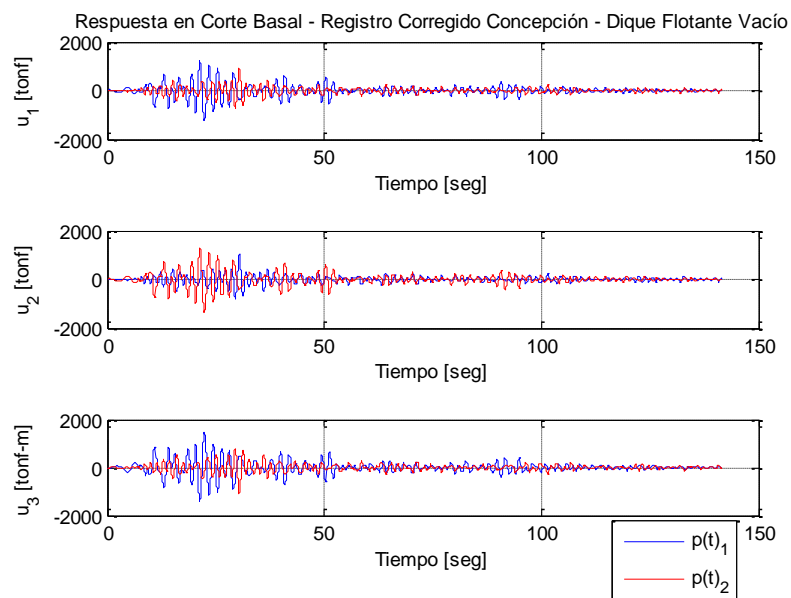


Figura IV-27: Corte basal con dique flotante cargado

Tabla IV-XII: Corte basal máximo de dique flotante cargado

Vo	p(t)	u_1 [t]	u_2 [t]	u_3 [t-m]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	1221	-73	-1416	1223
max(u_2)	1	-389	1016	505	1088
max(u_3)	1	-1237	230	1450	1259
min(u_1)	1	-1237	230	1450	1259
min(u_2)	1	432	-781	-551	893
min(u_3)	1	1220	-80	-1417	1223
max(u_1)	2	943	-422	-1095	1033
max(u_2)	2	-69	1315	33	1317
max(u_3)	2	-726	474	798	867
min(u_1)	2	-726	466	798	863
min(u_2)	2	213	-1333	-251	1349
min(u_3)	2	943	-422	-1096	1033

d) Respuestas del conjunto ante registro sísmico corregido y DF vacío

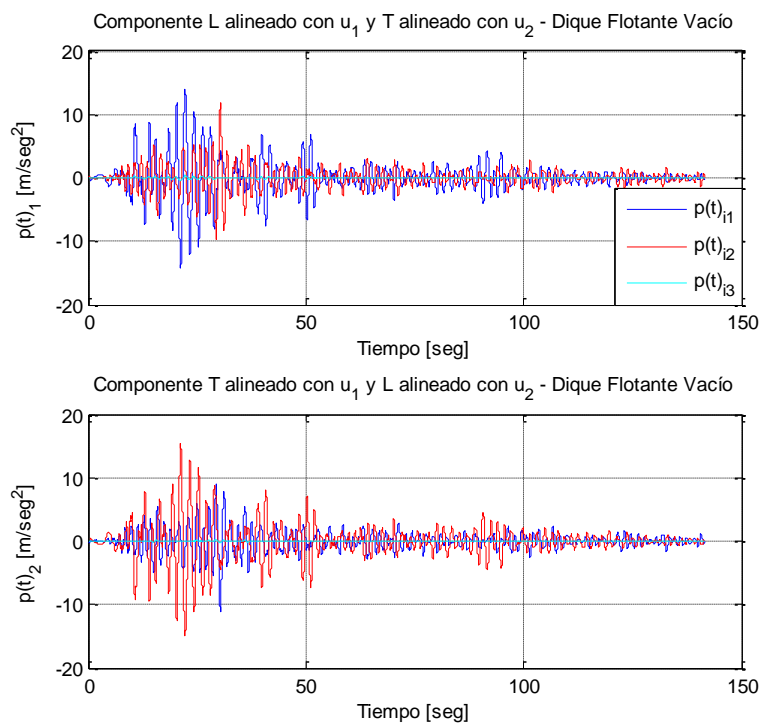


Figura IV-28: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)

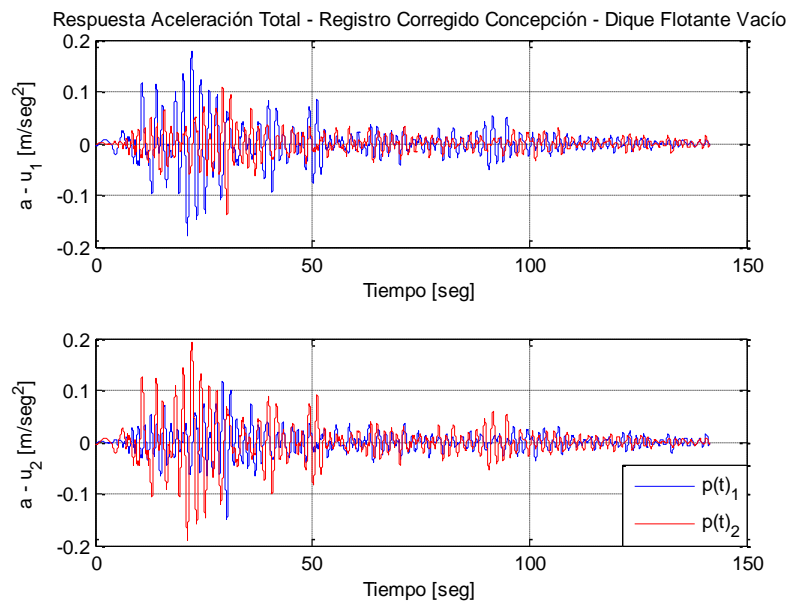


Figura IV-29: Aceleración total de dique flotante vacío

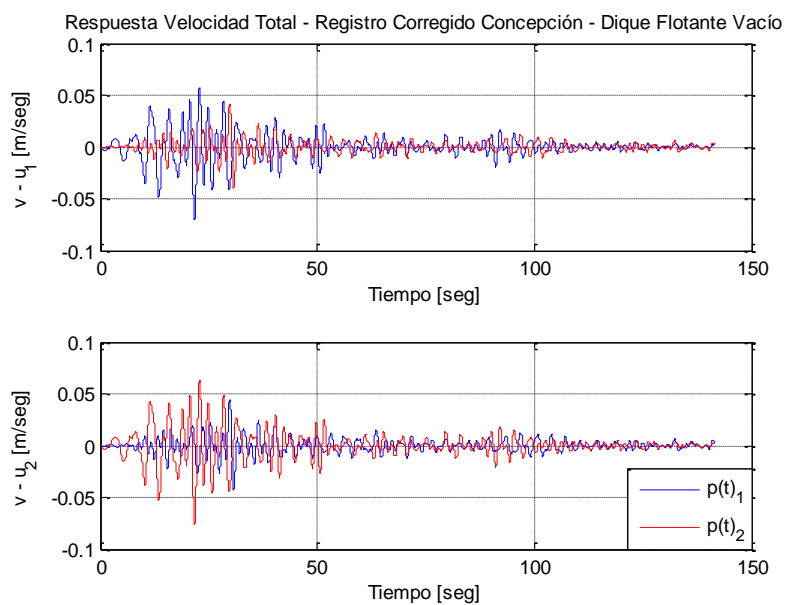


Figura IV-30: Velocidad total de dique flotante vacío

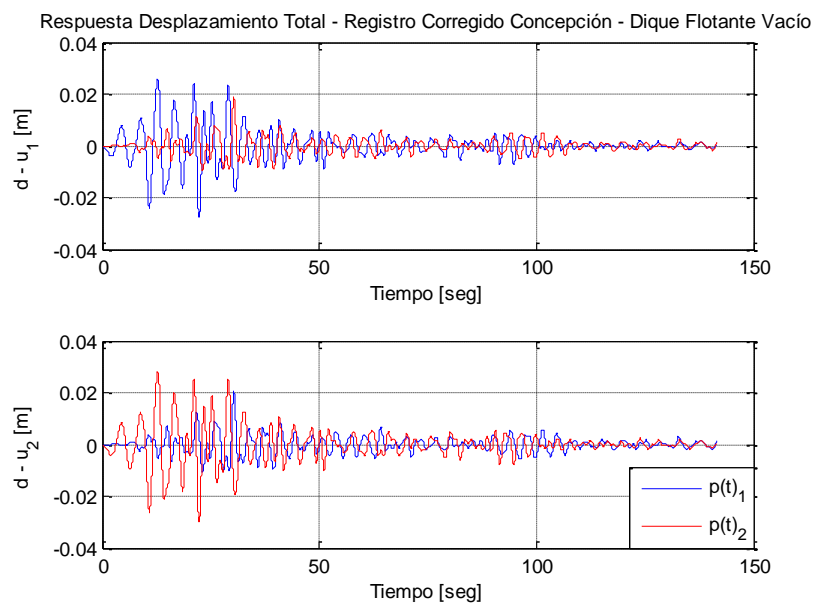


Figura IV-31: Desplazamiento total de dique flotante vacío

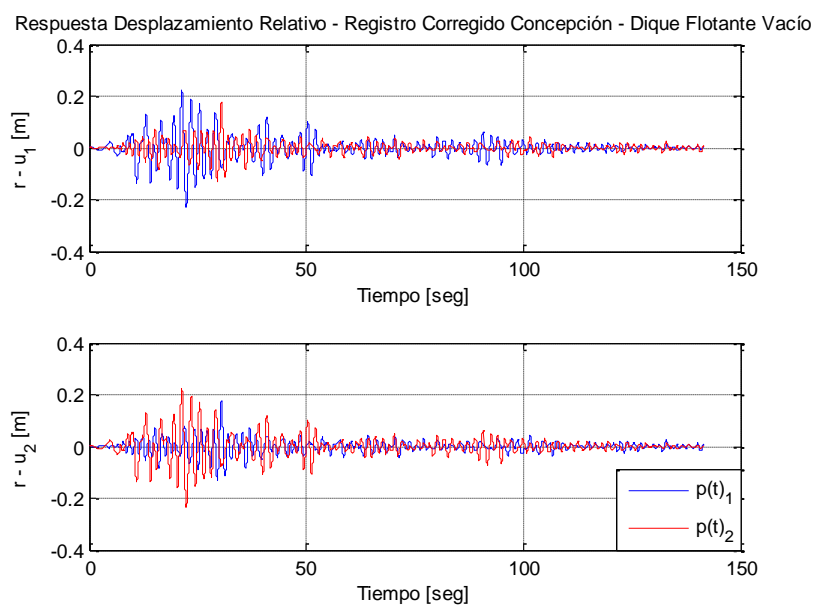


Figura IV-32: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío

Tabla IV-XIII: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío

r	p(t)	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	0.225	-0.009	-0.00000329	0.225
max(u_2)	1	-0.076	0.176	0.00000401	0.192
max(u_3)	1	-0.133	0.031	0.00000522	0.137
min(u_1)	1	-0.230	0.040	0.00000368	0.234
min(u_2)	1	0.085	-0.131	-0.00000286	0.156
min(u_3)	1	0.073	-0.029	-0.00000562	0.079
max(u_1)	2	0.174	-0.078	-0.00000416	0.191
max(u_2)	2	-0.010	0.226	-0.00000134	0.226
max(u_3)	2	-0.083	-0.106	0.00000298	0.135
min(u_1)	2	-0.131	0.085	0.00000028	0.156
min(u_2)	2	0.040	-0.233	-0.00000015	0.236
min(u_3)	2	0.167	-0.073	-0.00000421	0.183

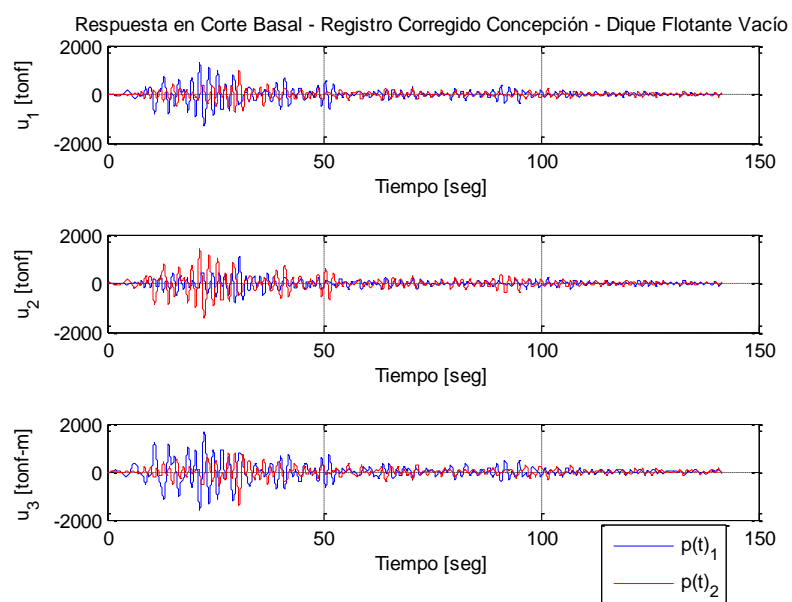


Figura IV-33: Corte basal con dique flotante vacío

Tabla IV-XIV: Corte basal máximo de dique flotante vacío

Vo	$\rho(t)$	$u_1 [t]$	$u_2 [t]$	$u_3 [t-m]$	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	1286	-55	-1612	1287
max(u_2)	1	-437	1080	797	1165
max(u_3)	1	-1317	245	1677	1339
min(u_1)	1	-1317	245	1677	1339
min(u_2)	1	486	-804	-748	940
min(u_3)	1	1284	-67	-1615	1286
max(u_1)	2	997	-476	-1388	1105
max(u_2)	2	-55	1387	-59	1388
max(u_3)	2	-743	565	801	933
min(u_1)	2	-747	520	796	910
min(u_2)	2	227	-1426	-247	1444
min(u_3)	2	997	-476	-1389	1105

e) Resumen de las respuestas obtenidas

El resumen de desplazamiento y corte basales máximos obtenidos para los registros base y corregido, en combinación con las condiciones del dique flotante vacío y cargado se presentan en las tablas siguientes:

Tabla IV-XV: Resumen de respuesta de desplazamiento

Registro		Base		Corregido	
p(t)	r	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado
1	max(u_1) [m]	0.400	0.531	0.225	0.215
1	max(u_2) [m]	0.437	0.348	0.192	0.180
1	max(u_3) [rad]	0.288	0.156	0.137	0.220
1	min(u_1) [m]	0.463	0.485	0.234	0.220
1	min(u_2) [m]	0.426	0.375	0.156	0.149
1	min(u_3) [rad]	0.378	0.460	0.079	0.082
2	max(u_1) [m]	0.471	0.341	0.191	0.179
2	max(u_2) [m]	0.391	0.463	0.226	0.215
2	max(u_3) [rad]	0.470	0.179	0.135	0.141
2	min(u_1) [m]	0.329	0.374	0.156	0.148
2	min(u_2) [m]	0.474	0.471	0.236	0.221
2	min(u_3) [rad]	0.273	0.363	0.183	0.170

Tabla IV-XVI: Resumen de respuesta de corte basal

Registro		Base		Corregido	
p(t)	Vo	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado
1	max(u_1) [t]	2349	3051	1287	1223
1	max(u_2) [t]	2574	2123	1165	1088
1	max(u_3) [t-m]	1401	210	1339	1259
1	min(u_1) [t]	2660	2545	1339	1259
1	min(u_2) [t]	2534	2244	940	893
1	min(u_3) [t-m]	2156	1550	1286	1223
2	max(u_1) [t]	2808	1948	1105	1033
2	max(u_2) [t]	2370	2815	1388	1317
2	max(u_3) [t-m]	1334	521	933	867
2	min(u_1) [t]	1910	2134	910	863
2	min(u_2) [t]	2887	2877	1444	1349
2	min(u_3) [t-m]	1515	2827	1105	1033

IV.1.7. Obtención de esfuerzos y deformaciones de diseño

Los esfuerzos y deformaciones de diseño de los pilotes, vigas y losa de los dolphins se obtienen mediante las siguientes combinaciones de carga, obtenidas de la publicación Unified Facilities Criteria UFC 4-152-1, Design: Piers and Wharves, año 2005.

Tabla IV-XVII: Combinaciones de carga LRFD

Mooring	1a	2b	3c	4d	5e	6f	7g	8h
D	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.9	0.9
L+I	0	1.6	1	0	1	1	0	0
B	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.9	0.9
Be	0	0	0	0	0	0	0	0
C	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.9	0.9
Cs	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.9	0.9
E	0	1.6	0	0	0	0	1.6	1.6
Eq	0	0	0	0	0	1	0	1
W	0	0	0	0.8	1.6	0	1.6	0
Ws	0	0	0	0.8	1.6	0	1.6	0
Wa	1.4	1.2	1.2	1.2	1.6	1.2	1.6	0.9
Was	1.4	1.2	1.2	1.2	1.6	1.2	1.6	0.9
RST	0	1.2	0	0	0	0	0	0
Ice	0	0.2	0	0	1	0	1	0

Tabla IV-XVIII: Combinaciones de carga ASD

Mooring	1a	2b	3c	4d	5e	6f	7g	8h	9i	10j
D	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6
L+I	0	1	0	0.75	0	0	0.75	0.75	0	0
B	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6
Be	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6
Cs	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6	0.6
E	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eq	0	0	0	0	0	0.7	0	0.53	0	0.7
W	0	0	0	0	1	0	0.75	0	1	0
Ws	0	0	0	0	1	0	0.75	0	1	0
Wa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6
Was	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.6
RST	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Ice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como puede observarse en las tablas IV-9 y IV-10, el tsunami no está considerado en ninguna de las combinaciones de carga sugeridas por la publicación utilizada como referencia.

De acuerdo a lo señalado en la sección II.5, no se contó con información para poder estimar la carga de tsunami sobre el proyecto en esta investigación, no obstante, esta carga debe ser considerada en el dimensionamiento de la infraestructura. Los esfuerzos de diseño que incluyan la carga de tsunami pueden ser obtenidos utilizando la combinación siguiente, en que para el tsunami se considera el mismo factor de carga asociado a la acción sísmica, en el caso de la combinación para diseño por factores de carga y resistencia:

La combinación de carga indicada es la siguiente:

$$\text{LRFD: } U = 1.2D + T_s \quad (4-1)$$

$$\text{ASD: } S = D + T_s \quad (4-2)$$

Adicionalmente, se sugiere también obtener los esfuerzos de diseño sobre la estructura para las combinaciones de carga estipuladas en la sección 4.5 de la norma chilena NCh2369.

IV.1.8. Verificación de demanda v/s capacidad

La verificación de los pilotes utilizados en los cuatro modelos analizados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV-XIX: Verificación de demanda v/s capacidad de pilotes

Verificación de demanda v/s capacidad								
Registro	Base		Base		Corregido		Corregido	
Condición DF	Cargado		Vacío		Cargado		Vacío	
D_{ext} (mm)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
t (mm)	20	26	20	26	20	26	20	26
L (cm)	3175	3175	3175	3175	3175	3175	3175	3175
K	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
F_y (Mpa)	350	350	350	350	350	350	350	350
F_u (Mpa)	457	457	457	457	457	457	457	457
A (cm ²)	741.4	958.9	741.4	958.9	741.4	958.9	741.4	958.9
I (cm ⁴)	1290805	1652915	1290805	1652915	1290805	1652915	1290805	1652915
W (cm ³)	21513	27549	21513	27549	21513	27549	21513	27549
r (cm)	41.73	41.52	41.73	41.52	41.73	41.52	41.73	41.52
KL/r	91.31	91.77	91.31	91.77	91.31	91.77	91.31	91.77
P_c (t)	1258	1617	1258	1617	1258	1617	1258	1617
M_c (t-m)	813	1093	813	1093	813	1093	813	1093
V_c (t)	652	844	652	844	652	844	652	844
D-C _{F-C}	1.060	0.999	1.029	0.975	0.459	0.439	0.459	0.439
$V_2/\phi_v V_n$	0.049	0.049	0.050	0.050	0.024	0.024	0.026	0.026
$V_3/\phi_v V_n$	0.053	0.052	0.042	0.042	0.025	0.025	0.027	0.027

IV.1.9. Comentario

Pese a que la capacidad de los pilotes es levemente superada al utilizar los registros sísmicos base, este pre diseño se considera satisfactorio atendiendo a que el sismo se aplica al conjunto DF – dolphins sin considerar la utilización de un factor de modificación de respuesta R por conceptos de ductilidad (diseño elástico).

IV.2. Dimensionamiento de dolphins con aisladores – Diseño definitivo

En este apartado se describe el análisis realizado para dimensionar unas estructuras marítimas de fondeo equipadas con aisladores sísmicos, tomando como punto de partida el pre diseño.

IV.2.1. Objetivos

Con la introducción de aisladores sísmicos en los dolphins se persiguen algunos de los siguientes objetivos:

- Disminuir la demanda sísmica sobre el conjunto DF - Dolphins por medio de un alargamiento de sus períodos fundamentales de vibración
- Disminuir la demanda de carga tomada por los pilotes.
- Disminuir el costo de construcción del proyecto.

IV.2.2. Descripción de los dolphins

La distribución en planta de los dolphins se muestra en la figura IV-1. Cada uno de los 8 dolphins del layout del proyecto posee una plataforma de hormigón armado de 12x12 metros y 25 cm de espesor, cuyo nivel superior está a la elevación +3.5 m NRS. Esta plataforma se apoya en vigas IN100x280 y pilotes hincados de ϕ 1000 mm, de espesores de pared de 18 y 22 mm.

El nivel de dragado del proyecto, corresponde a la cota -22 m NRS. Se asume como hipótesis que los pilotes quedan empotrados bajo el fondeo marino a una profundidad de 6 veces su diámetro aproximadamente.

La longitud de los pilotes, comprendida entre el nivel inferior de las vigas IN 100x280 y su punto de empotramiento bajo el fondo marino, es igual a 30 metros.

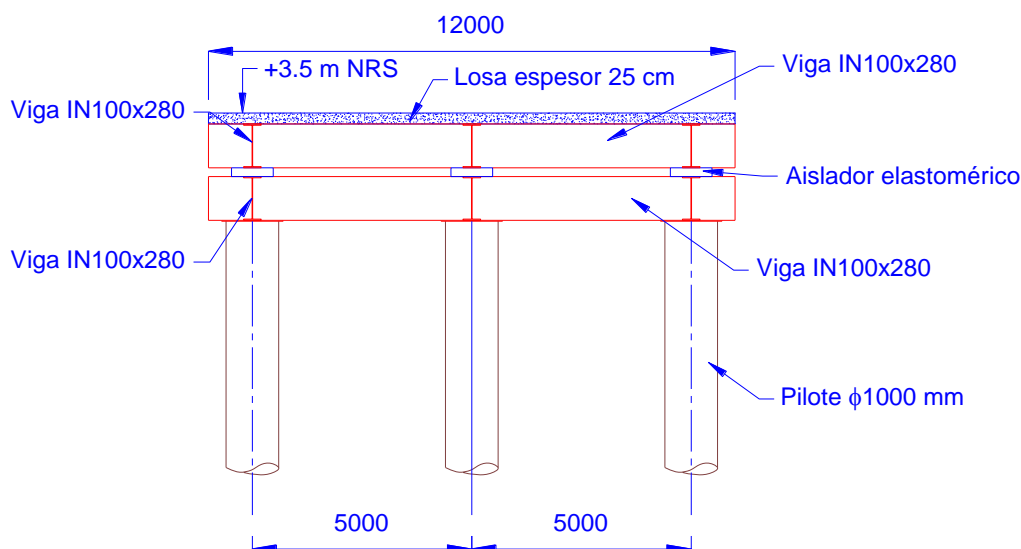


Figura IV-34: Sección transversal del dolphin típico con aisladores

IV.2.3. Procedimiento de diseño

En este apartado se describe el procedimiento utilizado para dimensionar los miembros estructurales de la configuración definitiva de los dolphins, es decir, seleccionar el o los aisladores elastoméricos y el o los tipos de pilotes que al trabajar conjuntamente poseen una capacidad que supera a la demanda de desplazamientos y/o esfuerzos impuestos por los estados de carga del proyecto.

El paso inicial de este procedimiento es adoptar uno o más tipos de pilotes para conformar un dolphin. Mediante fórmulas sencillas se puede realizar la estimación de la rigidez total del grupo de pilotes que conforman el dolphin si se conocen su geometría (momento de inercia, longitud) y materialidad.

La definición de la rigidez objetivo del grupo de aisladores se realiza adoptando una fracción de la rigidez del grupo de pilotes, pudiendo esta fracción o razón ser igual o mayor que la unidad. Si se fija el número de aisladores sísmicos que se desea utilizar es posible conocer la rigidez de cada aislador.

Debido a que el dolphin representa el funcionamiento en serie de los grupos de aisladores y de pilotes, si se obtiene la rigidez equivalente k_e que representa esta configuración se tendrá una idea de cómo ésta varía en las sucesivas iteraciones que se realicen hasta encontrar la configuración definitiva de la estructura.

$$\frac{1}{k_e} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (4-1)$$

La selección del aislador se realiza para la rigidez determinada anteriormente y para un desplazamiento máximo deseado considerando un tipo de caucho pues se requiere conocer la función $G(\gamma)$ de este material.

Con las dimensiones de los pilotes y aisladores que se conocen, se deben obtener las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento del conjunto DF – Dolphins. La respuesta de este conjunto frente a la carga sísmica se obtiene resolviendo la expresión que corresponde a la ecuación de movimiento que se obtiene de combinar las ecuaciones (3-15) y (3-16).

El desplazamiento máximo de los aisladores debe compararse con la deformación máxima que los estados de carga combinados producen sobre el conjunto DF – Dolphins. Si no se supera el desplazamiento máximo de los aisladores, se va al paso siguiente, que corresponde a verificar si la capacidad de los pilotes es superior a los esfuerzos de diseño producidos por los estados de carga combinados.

En caso de que la capacidad de los pilotes es la adecuada, el procedimiento de diseño finaliza concluyendo que los aisladores y pilotes analizados son una configuración válida, la cual puede ser adoptada como diseño definitivo o se puede optimizar con una nueva iteración.

Si las deformaciones producidas por los estados de carga combinados superan el desplazamiento máximo del aislador, pueden adoptarse dos caminos: se fija una nueva rigidez del aislador variando la razón entre la rigidez del grupo de aisladores y

la del grupo de pilotes y se repite el procedimiento; o, se puede mantener esta razón variando el desplazamiento de diseño del aislador, siendo necesario repetir los pasos siguientes del procedimiento.

Una vez comprobada la capacidad del o los aisladores se debe verificar los pilotes, si su capacidad es superada por la demanda debe volverse al primer paso del procedimiento, siendo necesario utilizar pilotes diferentes.

La figura IV-35 muestra un diagrama de flujo que explica el procedimiento utilizado para dimensionar los pilotes y aisladores elastoméricos requeridos por los dolphins.

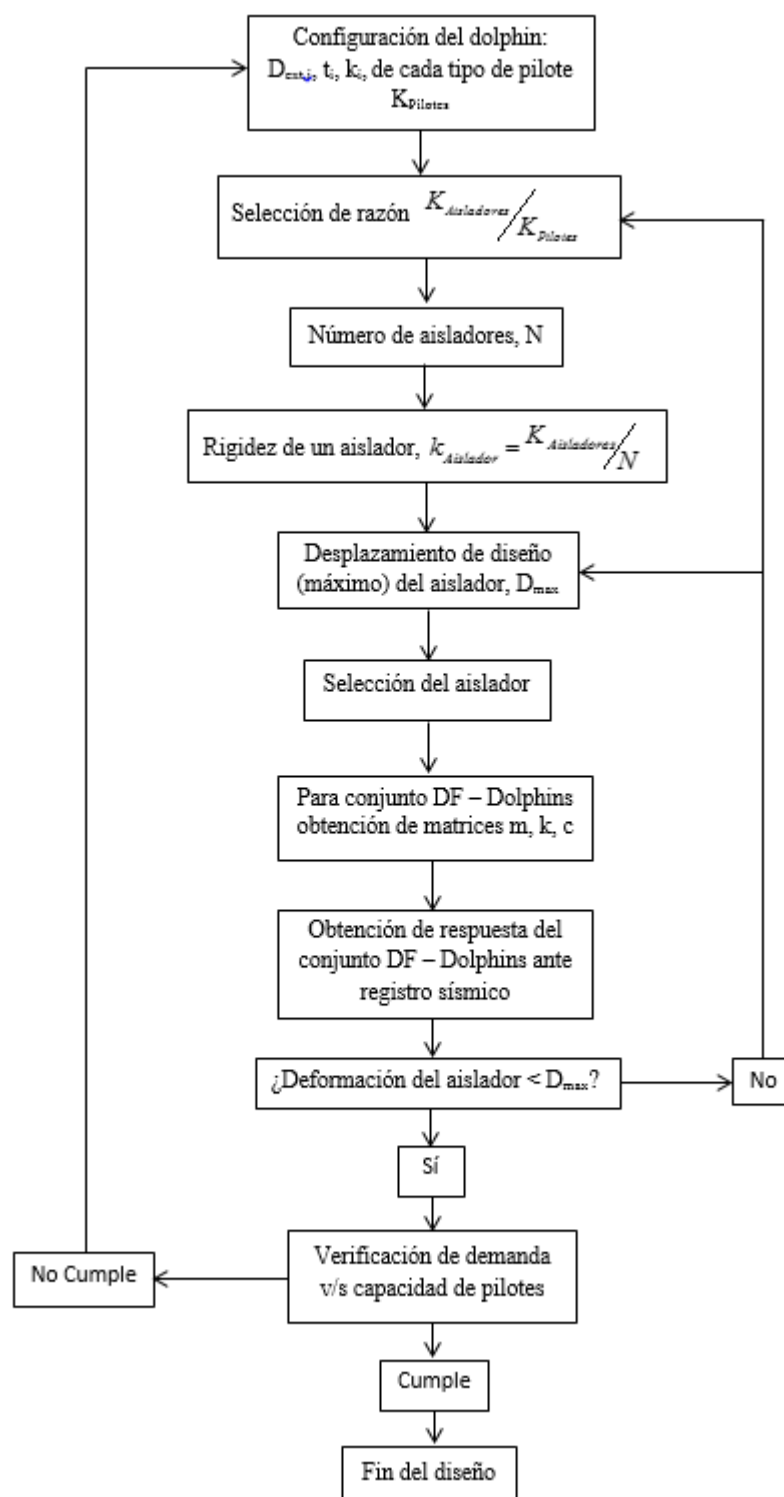


Figura IV-35: Procedimiento de diseño de dolphins equipados con aisladores sísmicos

IV.2.4. Selección de los aisladores elastoméricos

La selección del aislador utilizado en el proyecto se realiza bajo los siguientes supuestos:

Pilotes que conforman el dolphin típico

$D_{\text{ext}} =$	1.00	1.00	m
$t =$	0.022	0.018	m
$D_{\text{int}} =$	0.956	0.964	m
$A =$	0.068	0.056	m^2
$I =$	0.0081	0.0067	m^4
$r =$	0.346	0.347	m, radio de giro de la sección
$L =$	30.45	30.45	m
$KL/r =$	105.65	105.23	
$E =$	20,000,000	20,000,000	t/m^2
$n =$	6	3	unidades
$k =$	68.7	56.9	t/m, rigidez lateral de los pilotes
$n \times k =$	412.4	170.8	t/m

Rigidez horizontal del grupo, $k_{\text{Pilotes}} =$ 583.2 t/m 5832 kg/cm

Rigidez de pilotes que conforman el dolphin típico

$$k = 5831.6 \text{ kg/cm}$$

Rigidez horizontal objetivo deseada para el grupo de aisladores

$$k_{\text{G-aisl}}/k_{\text{dolphin}} = 1.2$$

$$k_{\text{G-aisl}} = 6997.9 \text{ kg/cm}$$

$$k_e = 3180.9 \text{ kg/cm} \quad \frac{1}{k_e} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}$$

Aisladores = 9 cantidad de aisladores del grupo

$k_{\text{aisl}} = 778$ kg/cm, rigidez de un aislador del grupo

Carga máxima vertical soportada por los aisladores

$$P_v = 73,250 \text{ kg}$$

$$\sigma_{\text{adm}} = 120 \text{ kg/cm}^2$$

Considerando aislador anular

$$\begin{aligned}
 D_{\text{aisl-ext}} &= 95 && \text{cm, diámetro exterior} \\
 D_{\text{aisl-int}} &= 30 && \text{cm, diámetro interior} \\
 A_{\text{aisl}} &= 6,381.4 && \text{cm}^2 \\
 \sigma_{\text{aisl}} &= 11.5 && \text{kg/cm}^2 \\
 \sigma_{\text{aisl}} < \sigma_{\text{adm}} &= \text{Ok}
 \end{aligned}$$

Para encontrar la altura total de la goma, utilizamos las siguientes expresiones:

$$k_{\text{aisl}} = \frac{G \cdot A}{H_r} \quad t_r = \frac{D}{\gamma}$$

Se utiliza goma X0.6R de Bridgestone, de su línea HDR - High Damping Rubber Bearing. La dependencia del módulo de corte y la deformación de corte se entrega en la siguiente fórmula:

$$G_{eq}(\gamma) = G_0 \cdot (2.855 - 3.878 \cdot \gamma + 2.903 \cdot \gamma^2 - 1.016 \cdot \gamma^3 + 0.1364 \cdot \gamma^4)$$

$$D_{\text{max}} = 40 \quad \text{cm, desplazamiento horizontal máximo del aislador}$$

$$\gamma = 0.537192054 \quad \text{Ok} \quad \gamma \text{ entre } 0.1 \text{ y } 2.7$$

Para encontrar γ , se resuelve la ecuación $\frac{G_{\text{eff}}(\gamma) \cdot A_{\text{aisl}}}{k_{\text{aisl}}} - \frac{D}{\gamma} = 0$

$$G_0 = 6.2 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$G_{eq}(\gamma) = 9.07 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$H_{eq}(\gamma) = H_{eq0} \cdot (0.915 + 0.2364 \cdot \gamma - 0.1804 \cdot \gamma^2 + 0.02902 \cdot \gamma^3)$$

$$H_{eq0} = 0.24 \quad \text{equivalent damping ratio at } \gamma = 1.0$$

$$H_{eq}(\gamma) = 0.239 \quad \text{equivalent damping ratio}$$

$$t_r = 8.27 \quad \text{cm, altura total de goma del aislador}$$

$$\nu = 0.4997 \quad \text{módulo de Poisson}$$

$E_{\text{aisl}} =$	27.213	kg/cm ² , módulo de elasticidad de la goma
$\rho =$	950	kg/m ³
$V_{\text{max}} =$	31.10	[t], esfuerzo de corte máximo que toma el aislador
FS =	1.50	factor de seguridad recomendado
$\varepsilon_b =$	6.5	límite entre 5 y 7, recomendado por el fabricante
t =	0.673	cm, espesor de una lámina de goma del aislador
S =	48.30	factor de forma
$\lambda =$	0.681	
$E_c =$	86,448	kg/cm ²
$K_v =$	819,824,105	kg/cm, rigidez vertical del aislador
$A_{\text{eff}} =$	4,286	cm ² , área del aislador en su posición deformada
$\sigma =$	17	kg/cm ²
$\varepsilon_c =$	0.000198	deformación unitaria por compresión del aislador
$\gamma_s =$	3.626	deformación unitaria por corte del aislador
$\gamma_c =$	0.057	deformación unitaria por corte debida por carga vertical
$\gamma_0 =$	3.683	deformación por corte máxima del aislador
t =	0.6	cm, espesor de capa de goma asumido para el diseño
$n_r =$	13	número de capas de goma necesarias
$\sigma_c =$	11.5	kg/cm ² , carga de compresión en las placas de acero
$F_y =$	2,400	kg/cm ² , límite de fluencia de las placas de acero
$\sigma_s =$	1,800	kg/cm ² , tensión máxima en las placas de acero
$t_s >$	0.01	cm, espesor mínimo de placa de acero
$t_s =$	0.2	cm, espesor de placa de acero asumida para diseño
$t_{s,\text{ext}} =$	2.5	cm, espesor de placas exteriores del aislador
	Ok	Verificación de espesor de placas intermedias de acero
$f_v =$	527	hz, frecuencia vertical del aislador
	> 10 hz Ok	verificación de frecuencia de vibración vertical mínima
$H_t =$	15.2	cm, altura total del aislador, considerando acero y goma
I =	3,958,437	cm ⁴ , momento de inercia del aislador
$E_b =$	42,348	kg/cm ²

$K_0 =$	20,261,432,630	kg/cm
$T =$	307,973,775,983	kg
$P_E =$	13,156,073,991	kg, carga de Euler
$R =$	106,368	kg
$P_{cr} =$	25,091,313	kg
$FS =$	342.54	$FS_{min} = 2$, factor de seguridad mínimo al pandeo
	Ok	Verificación de pandeo

IV.2.5. Matriz de masa del conjunto DF - dolphins

Las matrices de masa utilizadas en el dimensionamiento de la estructura son las siguientes:

Tabla IV-XX: Masa del conjunto

Condición del DF	Δ [t]	Σ Dolphins [t]	M [t]	I_0 [t-m ²]
Vacío	73,487	2,339	75,826	679,730,606
Cargado	133,488	2,339	135,827	1,219,866,409

$$m_{Vacío} = \begin{bmatrix} 75,826 & 0 & 0 \\ 0 & 75,826 & 0 \\ 0 & 0 & 679,730,606 \end{bmatrix}$$

$$m_{Cargado} = \begin{bmatrix} 135,827 & 0 & 0 \\ 0 & 135,827 & 0 \\ 0 & 0 & 1,219,866,409 \end{bmatrix}$$

IV.2.6. Matriz de rigidez del conjunto DF - dolphins

Con apoyo de SAP2000 V15.1.0 se prepara modelo 3D del conjunto, utilizando para ellos elementos tipo FRAME para vigas y pilotes, elementos RUBBER ISOLATOR

para los aisladores y elementos tipo AREA para la losa de hormigón armado de los dolphins y el dique flotante.

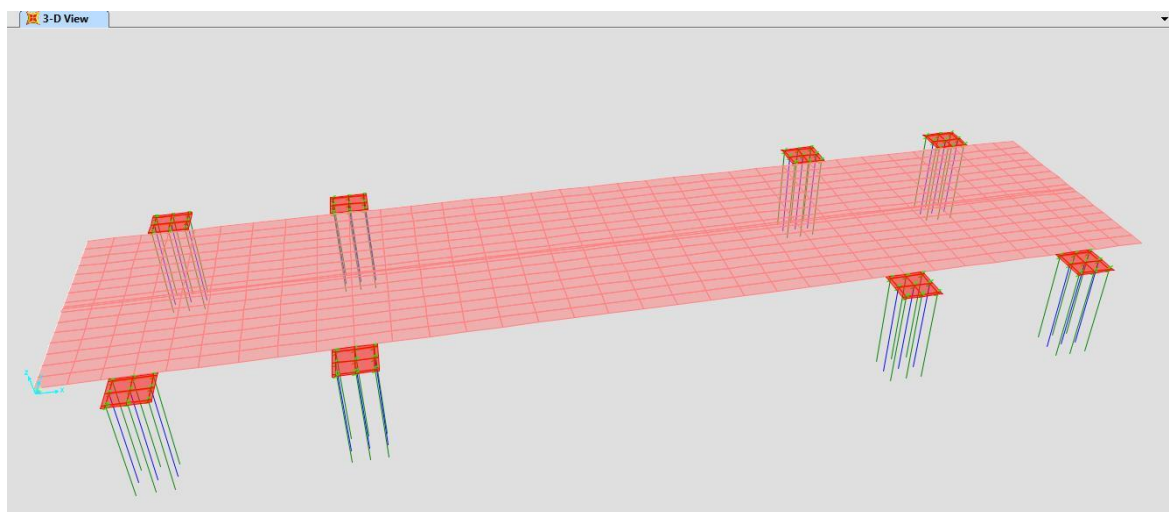


Figura IV-36: Modelo 3D del conjunto dique flotante - dolphins

Al igual que en el análisis realizado para los dolphins que no cuentan con aisladores, se asume como hipótesis que la conexión entre los dolphins y el dique flotante es de tipo Body, lo que quiere decir que los nodos restringidos se mueven juntos como si formaran parte de un cuerpo tridimensional.

De acuerdo al procedimiento descrito en III.2.2 se obtiene la matriz de rigidez del conjunto DF – Dolphins.

Tabla IV-XXI: Períodos y factores de participación modal dique flotante vacío

Modo	Periodo [s]	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	11.453785	0.997962	8.033E-14	0	1.568E-15	0.001129	0.03876
2	11.303196	8.031E-14	0.998138	0	0.01948	9.087E-17	0.70653
3	9.018398	1.298E-07	3.654E-15	0	7.13E-17	1.469E-10	0.252563

$$T_n = \begin{bmatrix} 11.45 & 0 & 0 \\ 0 & 11.30 & 0 \\ 0 & 0 & 9.02 \end{bmatrix}; \omega_n = \begin{bmatrix} 0.5487 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5560 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6966 \end{bmatrix}$$

Tabla IV-XXII: Desplazamientos centro de masa de dique flotante vacío

Nodo	Modo	U1 [m]	U2 [m]	U3 [m]	R1 [rad]	R2 [rad]	R3 [rad]
4873	1	-0.011449	3.246E-09	0	0	0	-2.679E-08
4873	2	-3.248E-09	-0.011443	0	0	0	-7.257E-12
4873	3	0.000004129	6.923E-10	0	0	0	-0.00012

$$\Phi = \begin{bmatrix} -0.011449 & 0.000000003246 & -0.00000002679 \\ -0.000004129 & -0.011443 & -0.00000000007257 \\ 0.000004129 & 0.0000000006923 & -0.00012 \end{bmatrix}$$

Mediante la ecuación (3-8) se obtiene la matriz de rigidez del conjunto considerando el dique flotante vacío.

$$k_{Vacio} = \begin{bmatrix} 2317.78727 & -0.000017548 & 2300.40754 \\ -0.000017548 & 2379.72974 & 0.36970553 \\ 2300.40754 & 0.36970553 & 33621297.3 \end{bmatrix}$$

Tabla IV-XXIII: Períodos y factores de participación modal dique flotante cargado

Modo	Periodo [s]	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	15.375373	0.998858	7.764E-14	0	2.061E-15	0.001365	0.03886
2	15.169703	7.762E-14	0.998958	0	0.026523	1.061E-16	0.708304
3	12.074358	1.305E-07	4.042E-15	0	1.073E-16	1.784E-10	0.251631

$$T_n = \begin{bmatrix} 15.38 & 0 & 0 \\ 0 & 15.17 & 0 \\ 0 & 0 & 12.07 \end{bmatrix}; \omega_n = \begin{bmatrix} 0.408 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4141 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5206 \end{bmatrix}$$

Tabla IV-XXIV: Desplazamientos centro de masa de dique flotante cargado

Nodo	Modo	U1 [m]	U2 [m]	U3 [m]	R1 [rad]	R2 [rad]	R3 [rad]
4873	1	0.008529	-2.377E-09	0	0	0	1.995E-08
4873	2	-2.378E-09	-0.008526	0	0	0	-5.699E-12
4873	3	-0.000003083	-5.424E-10	0	0	0	0.00009

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.008529 & -0.000000002377 & 0.00000001995 \\ -0.000000002378 & -0.008526 & -0.00000000005699 \\ -0.000003083 & -0.0000000005424 & 0.00009 \end{bmatrix}$$

Al igual que en el caso del dique flotante vacío, mediante la ecuación (3-8) se obtiene la matriz de rigidez del conjunto considerando el dique flotante cargado.

$$k_{Cargado} = \begin{bmatrix} 2305.40549 & -0.000017893 & 2339.48948 \\ 0.000017893 & 2369.67513 & -0.39400154 \\ 2339.48948 & -0.39400154 & 33696783.5 \end{bmatrix}$$

IV.2.7. Matriz de amortiguamiento conjunto DF - dolphins

Una vez que ya se conocen las matrices de masa y rigidez del conjunto, se puede construir la matriz de amortiguamiento del conjunto. Se considera una razón de amortiguamiento del 5% para todos los grados de libertad.

Las matrices de amortiguamiento del conjunto considerando las condiciones de dique flotante vacío y cargado son las siguientes:

$$C_{n-Vacio} = \begin{bmatrix} 0.05487 & 0 & 0 \\ 0 & 0.055603 & 0 \\ 0 & 0 & 0.069662 \end{bmatrix}$$

$$c_{Vacio} = \begin{bmatrix} 422.37 & -0.0000023006 & 184.72 \\ -0.0000023006 & 427.98 & 0.029515 \\ 184.72 & 0.029515 & 4826566.33057 \end{bmatrix}$$

$$C_{n-Cargado} = \begin{bmatrix} 0.040849 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04141 & 0 \\ 0 & 0 & 0.052059 \end{bmatrix}$$

$$c_{Cargado} = \begin{bmatrix} 564.3116 & 0.00000321236 & 251.8061 \\ 0.00000321236 & 572.1297 & -0.04215 \\ 251.8061 & -0.042151 & 6473108.67987 \end{bmatrix}$$

IV.2.8. Análisis sísmico del conjunto DF – dolphins

Al igual que en el caso del pre diseño, como carga sísmica se utilizan los registros de aceleraciones del terremoto del 27 de Febrero 2010 medido en Concepción. Este análisis se realiza para las condiciones del dique flotante vacío y cargado, y considerando los registros sísmicos base y corregido por el procedimiento de corrección de línea base parabólica.

f) Respuestas del conjunto ante registro sísmico base y DF cargado

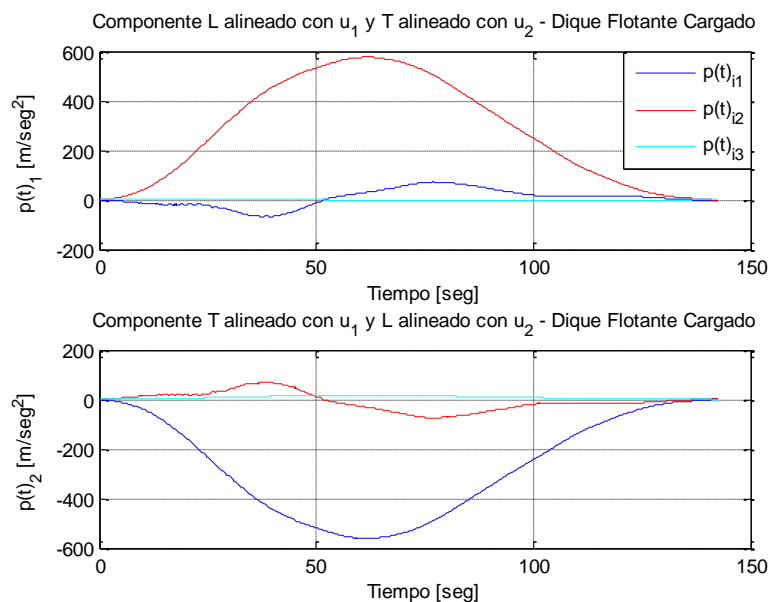


Figura IV-37: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)

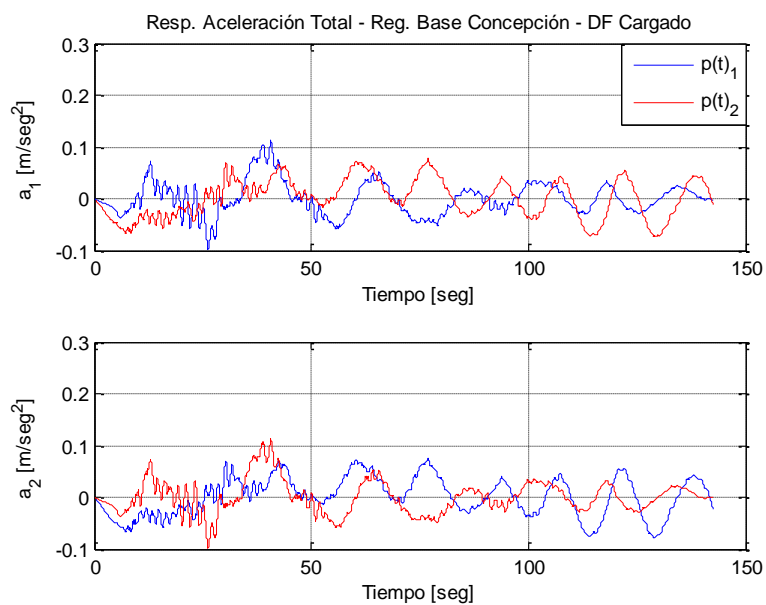


Figura IV-38: Aceleración total de dique flotante cargado

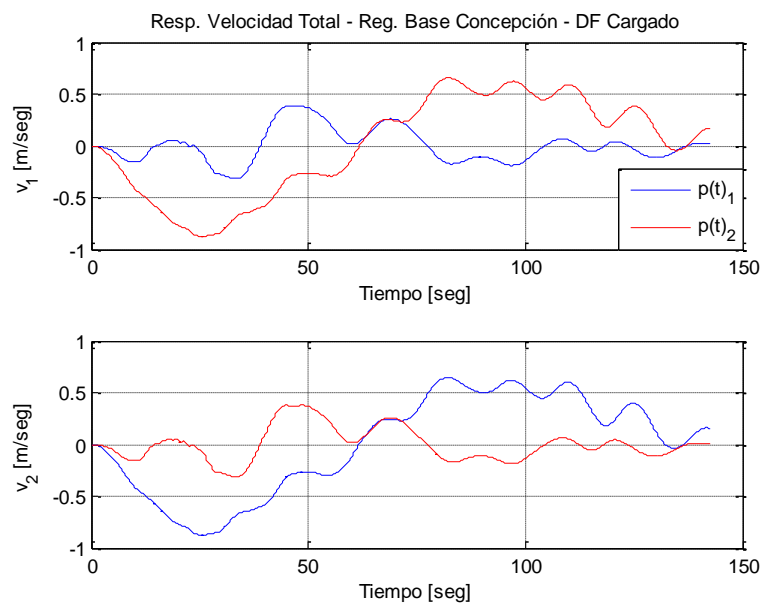


Figura IV-39: Velocidad total de dique flotante cargado

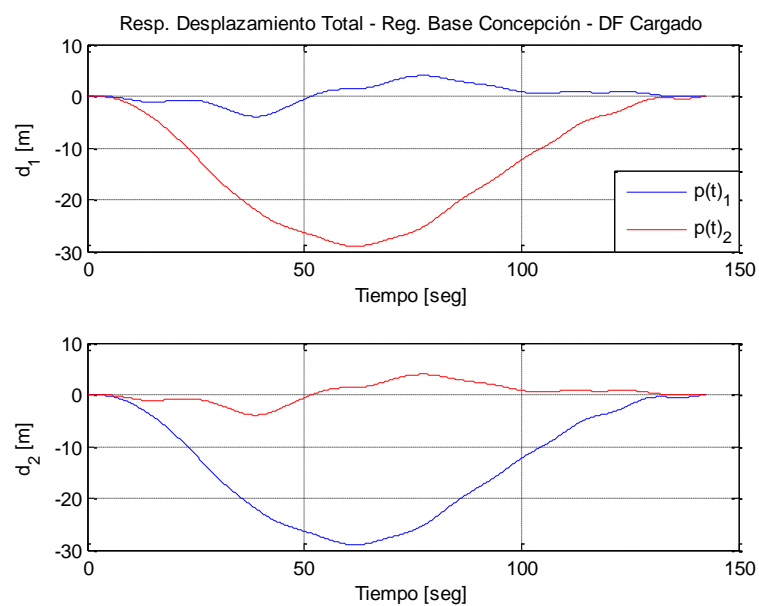


Figura IV-40: Desplazamiento total de dique flotante cargado

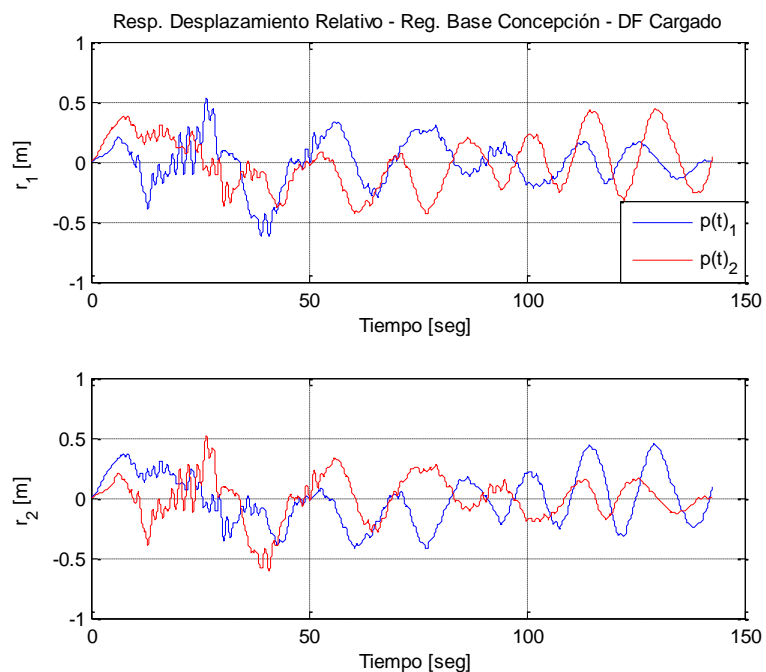


Figura IV-41: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado

Tabla IV-XXV: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado

r	p(t)	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2 + u_2^2)$
max(u_1)	1	0.535	-0.034	-0.000001	0.536
max(u_2)	1	0.052	0.452	-0.000020	0.455
max(u_3)	1	-0.281	-0.195	0.000063	0.342
min(u_1)	1	-0.624	-0.244	0.000061	0.670
min(u_2)	1	0.242	-0.426	0.000000	0.490
min(u_3)	1	0.195	-0.077	-0.000054	0.210
max(u_1)	2	0.440	0.023	-0.000090	0.440
max(u_2)	2	-0.026	0.519	0.000009	0.519
max(u_3)	2	-0.215	0.133	0.000081	0.253
min(u_1)	2	-0.442	0.220	0.000032	0.493
min(u_2)	2	-0.236	-0.609	-0.000003	0.653
min(u_3)	2	0.432	-0.010	-0.000096	0.432

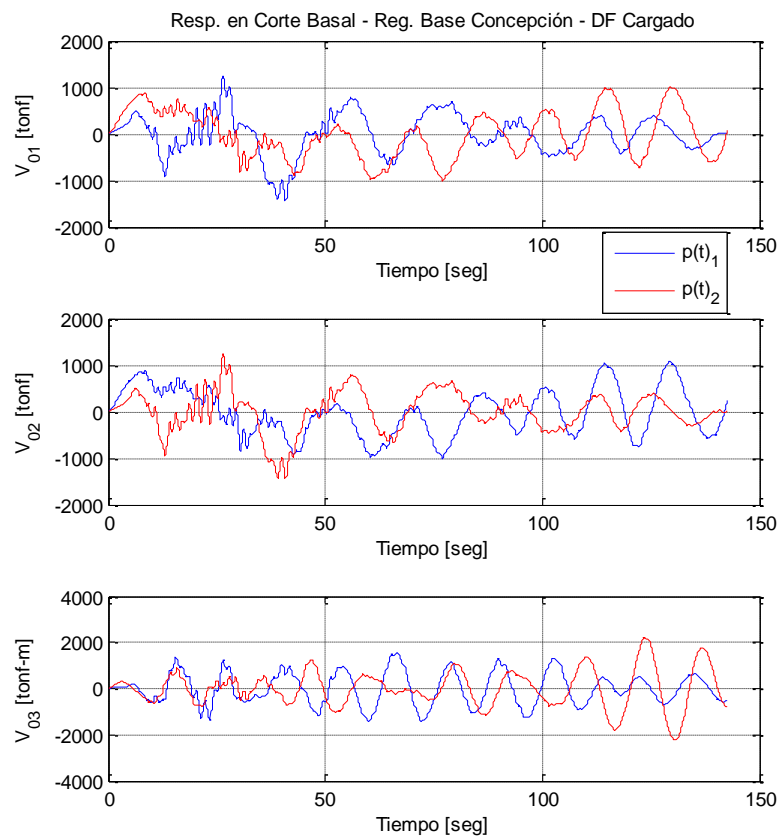


Figura IV-42: corte basal con dique flotante cargado

Tabla IV-XXVI: Corte basal máximo de dique flotante cargado

Vo	p(t)	u_1 [t]	u_2 [t]	u_3 [t-m]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	1234	-81	1233	1237
max(u_2)	1	120	1071	-568	1078
max(u_3)	1	-460	-326	1561	564
min(u_1)	1	-1439	-578	584	1551
min(u_2)	1	557	-1009	569	1153
min(u_3)	1	348	-146	-1421	377
max(u_1)	2	1013	54	-2014	1015
max(u_2)	2	-61	1229	233	1230
max(u_3)	2	-492	311	2219	582
min(u_1)	2	-1019	520	57	1144
min(u_2)	2	-544	-1443	-648	1542
min(u_3)	2	974	-45	-2217	975

g) Respuestas del conjunto ante registro sísmico base y DF vacío

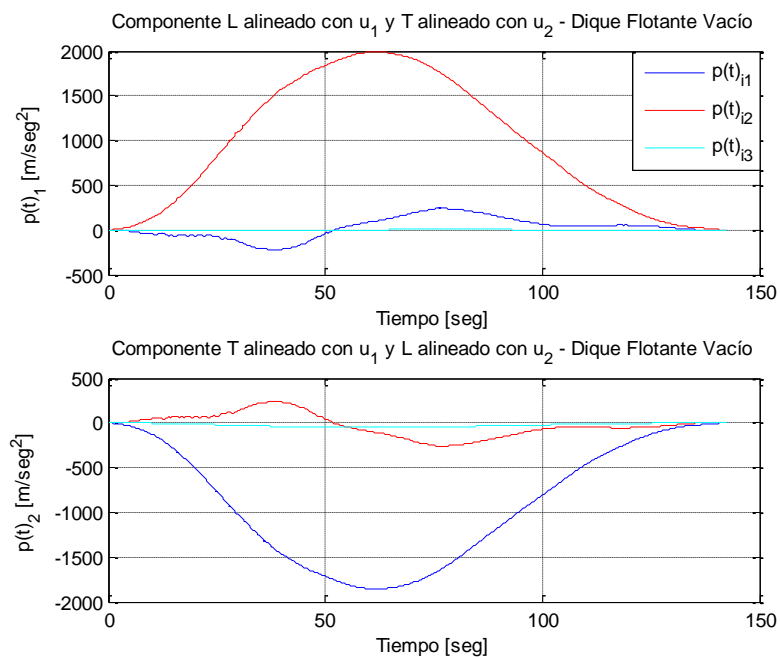


Figura IV-43: Input de la ecuación de movimiento (Ver ecuación 3-12)

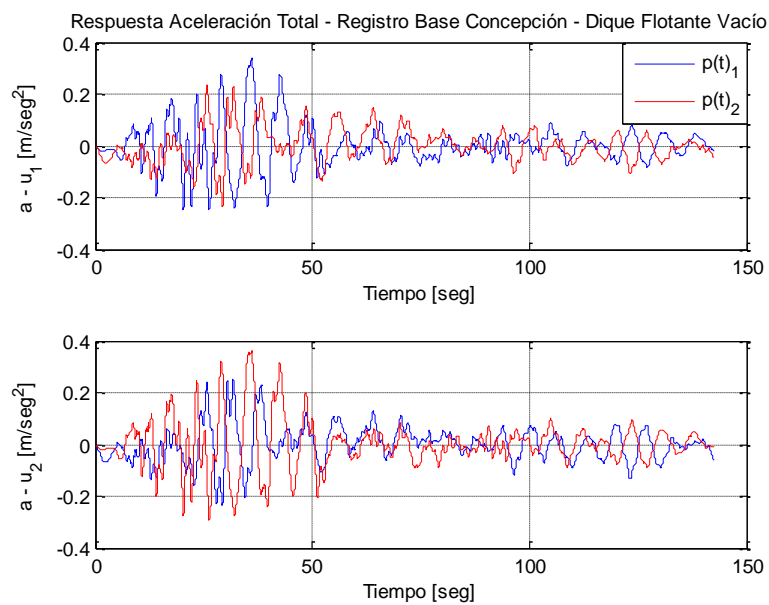


Figura IV-44: Aceleración total de dique flotante vacío

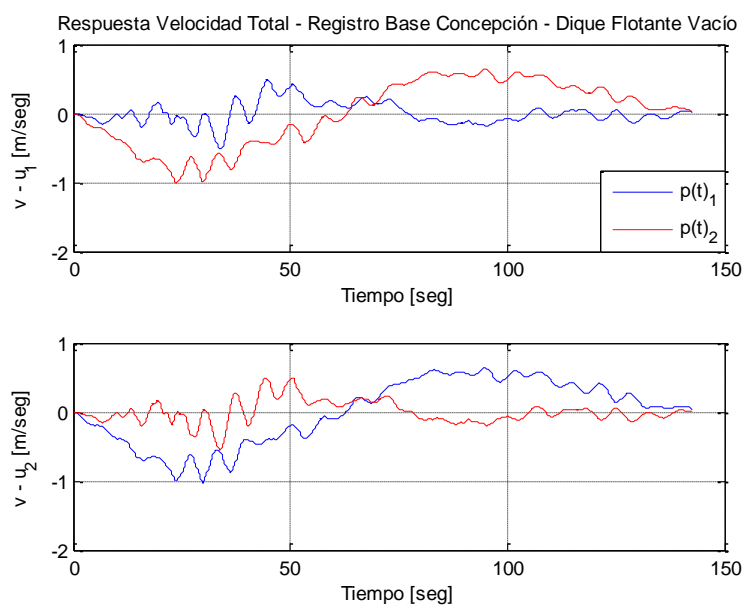


Figura IV-45: Velocidad total de dique flotante vacío

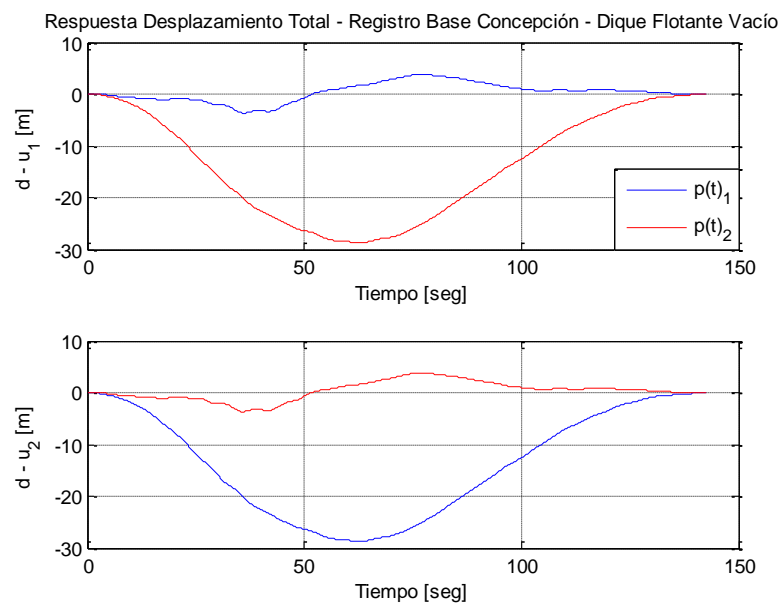


Figura IV-46: Desplazamiento total de dique flotante vacío

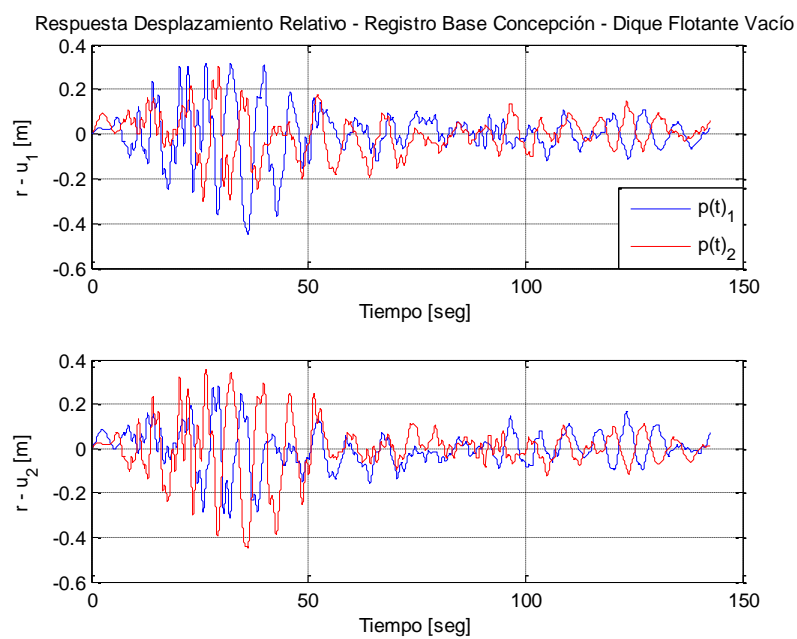


Figura IV-47: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío

Tabla IV-XXVII: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío

r	p(t)	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	0.572	0.029	-0.000041	0.573
max(u_2)	1	0.162	0.325	-0.000006	0.363
max(u_3)	1	-0.082	-0.114	0.000077	0.141
min(u_1)	1	-0.313	-0.057	0.000024	0.318
min(u_2)	1	-0.105	-0.357	-0.000004	0.372
min(u_3)	1	0.337	0.013	-0.000074	0.337
max(u_1)	2	0.330	0.165	-0.000031	0.369
max(u_2)	2	0.032	0.579	-0.000045	0.580
max(u_3)	2	-0.238	-0.096	0.000062	0.256
min(u_1)	2	-0.349	-0.131	0.000038	0.372
min(u_2)	2	-0.302	-0.327	0.000045	0.445
min(u_3)	2	0.290	0.178	-0.000058	0.340

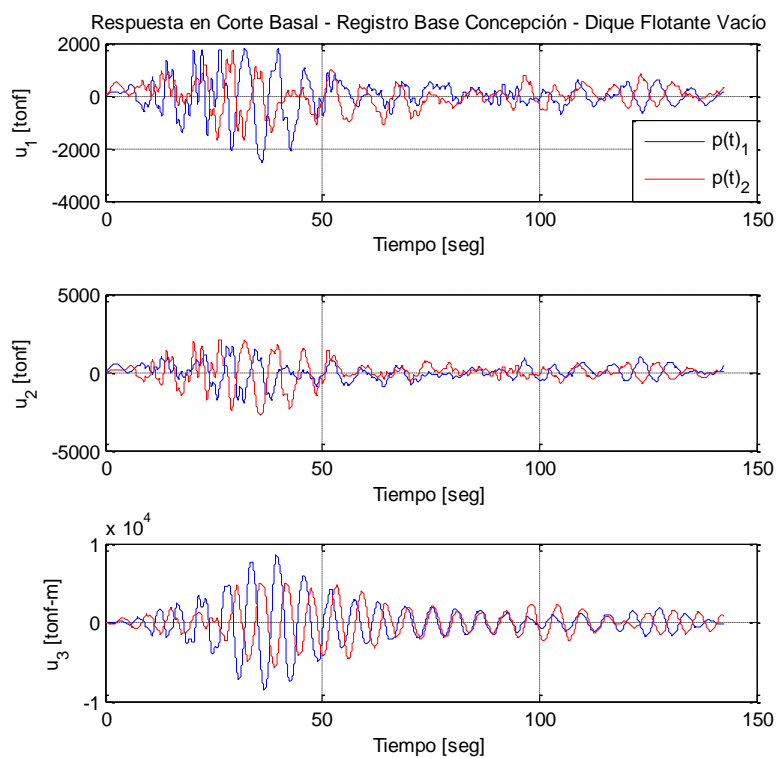


Figura IV-48: Corte basal con dique flotante vacío

Tabla IV-XXVIII: Corte basal máximo de dique flotante vacío

Vo	$\rho(t)$	u_1 [t]	u_2 [t]	u_3 [t-m]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	1326	70	-51	1328
max(u_2)	1	376	772	158	859
max(u_3)	1	-184	-267	2394	325
min(u_1)	1	-725	-135	81	738
min(u_2)	1	-243	-849	-377	883
min(u_3)	1	-184	-155	-2393	240
max(u_1)	2	765	393	-279	861
max(u_2)	2	73	1378	-1438	1380
max(u_3)	2	-319	547	1591	634
min(u_1)	2	-808	-311	481	865
min(u_2)	2	-700	-778	803	1047
min(u_3)	2	-15	7	-1613	17

h) Respuestas del conjunto ante registro sísmico corregido y DF cargado

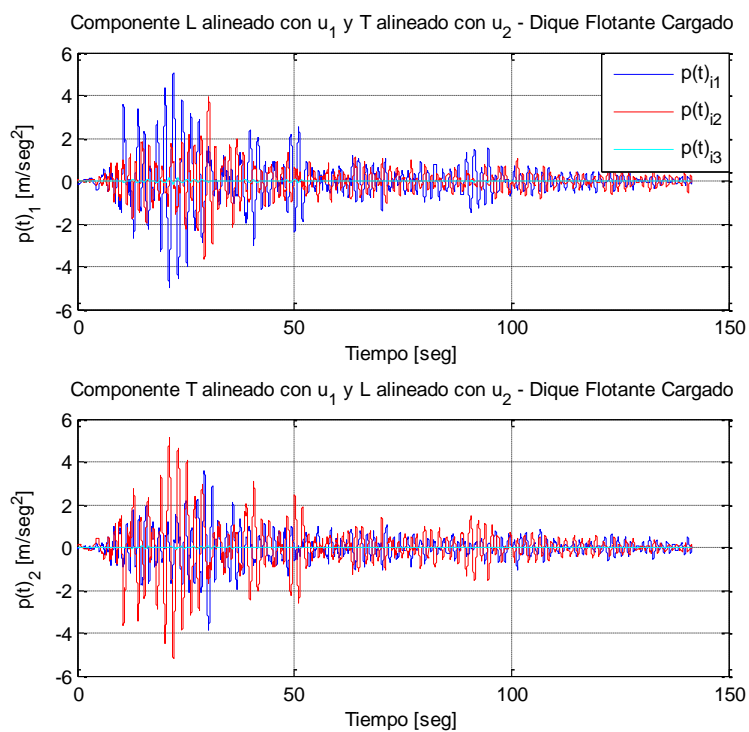


Figura IV-49: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)

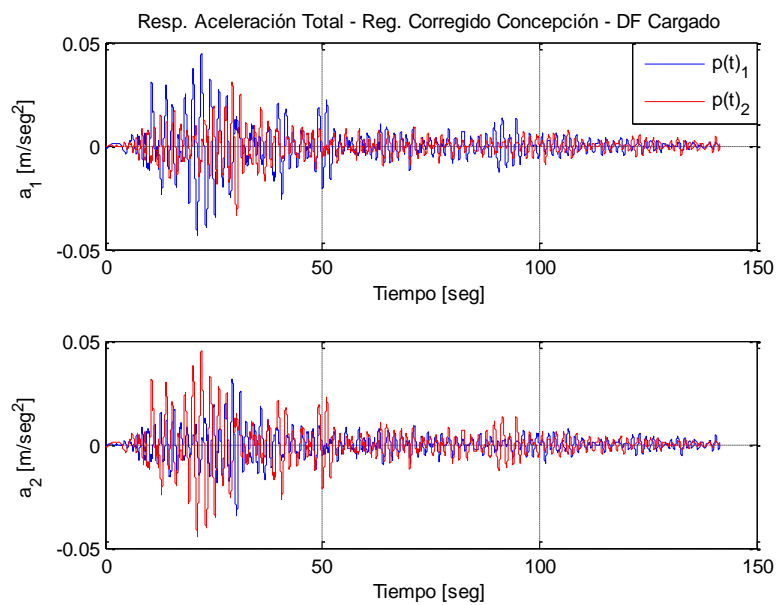


Figura IV-50: Aceleración total de dique flotante cargado

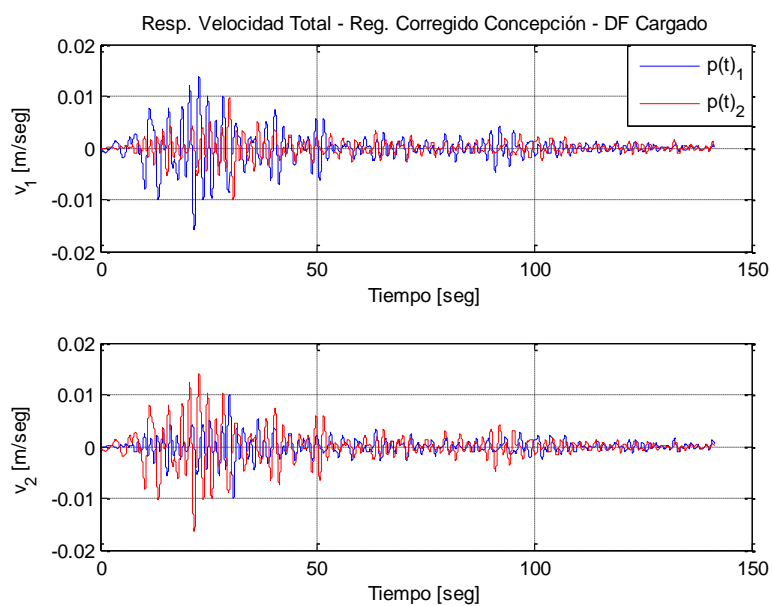


Figura IV-51: Velocidad total de dique flotante cargado

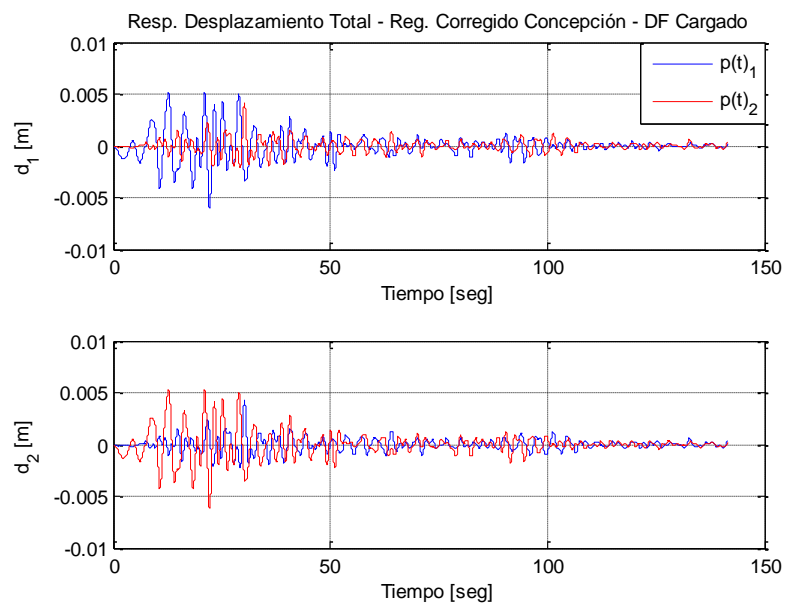


Figura IV-52: Desplazamiento total de dique flotante cargado

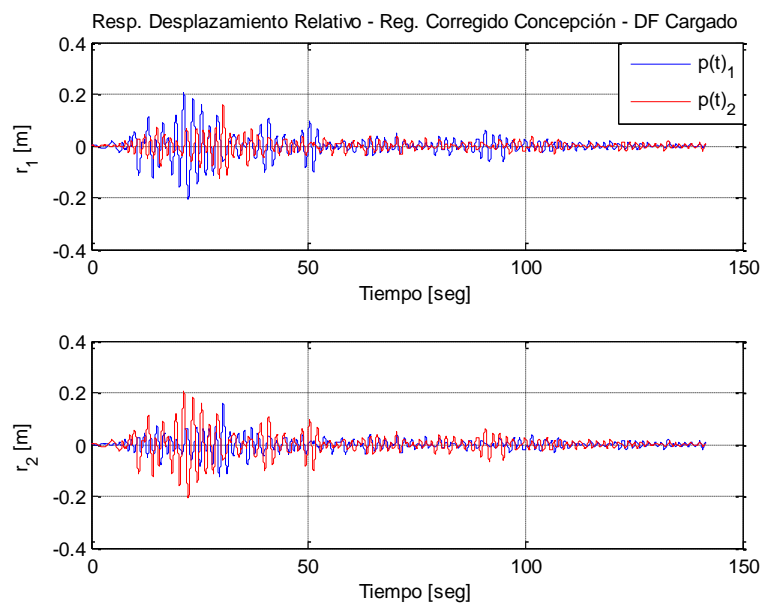


Figura IV-53: Desplazamiento relativo de dique flotante cargado

Tabla IV-XXIX: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante cargado

r	$\rho(t)$	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
$\max(u_1)$	1	0.208	-0.014	0.00000065	0.208
$\max(u_2)$	1	-0.063	0.160	-0.00000030	0.172
$\max(u_3)$	1	0.167	-0.028	0.00000072	0.169
$\min(u_1)$	1	-0.208	0.036	-0.00000056	0.211
$\min(u_2)$	1	0.070	-0.125	0.00000029	0.144
$\min(u_3)$	1	-0.111	0.031	-0.00000063	0.115
$\max(u_1)$	2	0.160	-0.063	0.00000042	0.172
$\max(u_2)$	2	-0.014	0.208	0.00000013	0.209
$\max(u_3)$	2	0.146	-0.056	0.00000044	0.156
$\min(u_1)$	2	-0.125	0.070	-0.00000017	0.144
$\min(u_2)$	2	0.036	-0.208	0.00000009	0.211
$\min(u_3)$	2	-0.080	0.110	-0.00000022	0.136

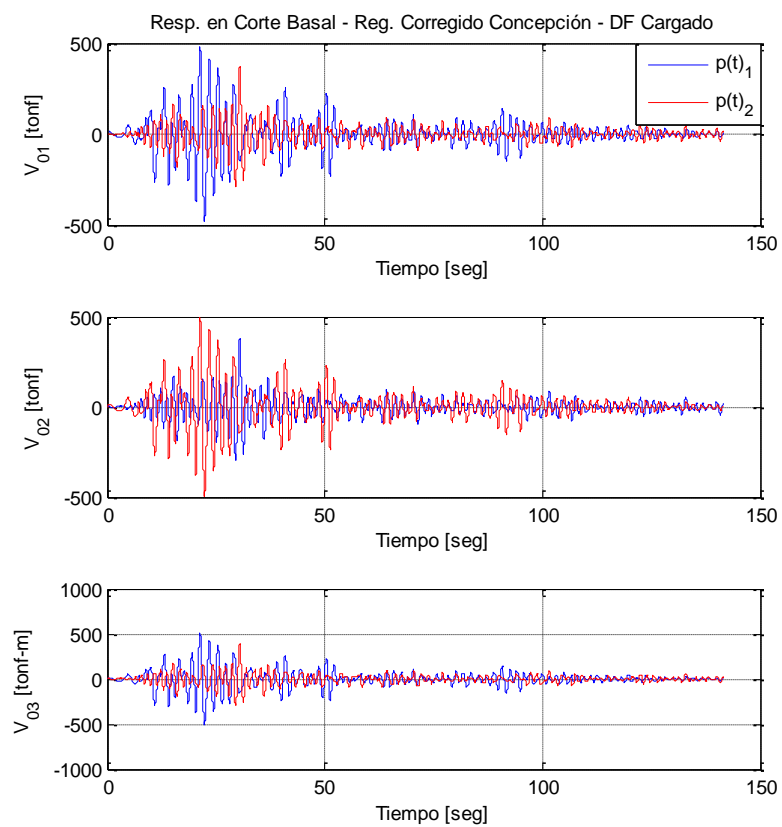


Figura IV-54: Corte basal con dique flotante cargado

Tabla IV-XXX: Corte basal máximo de dique flotante cargado

Vo	p(t)	u_1 [t]	u_2 [t]	u_3 [t-m]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	480	-32	509	481
max(u_2)	1	-145	379	-158	406
max(u_3)	1	480	-32	509	481
min(u_1)	1	-480	86	-506	488
min(u_2)	1	162	-297	175	338
min(u_3)	1	-480	86	-506	488
max(u_1)	2	369	-150	388	398
max(u_2)	2	-32	493	-28	494
max(u_3)	2	369	-150	388	398
min(u_1)	2	-288	167	-298	333
min(u_2)	2	83	-494	88	500
min(u_3)	2	-288	170	-298	335

i) Respuestas del conjunto ante registro sísmico corregido y DF vacío

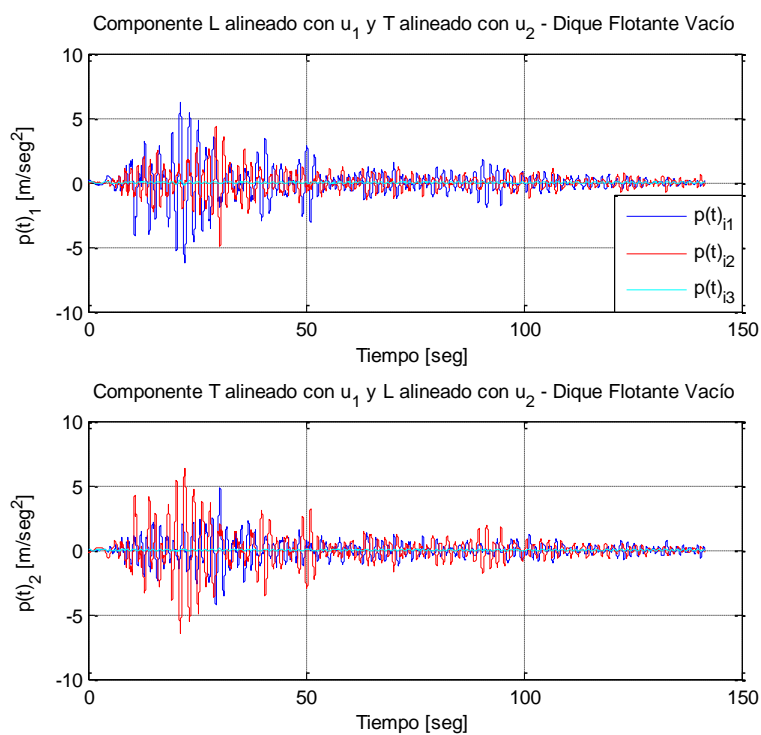


Figura IV-55: Input de la ecuación de movimiento (ver ecuación 3-12)

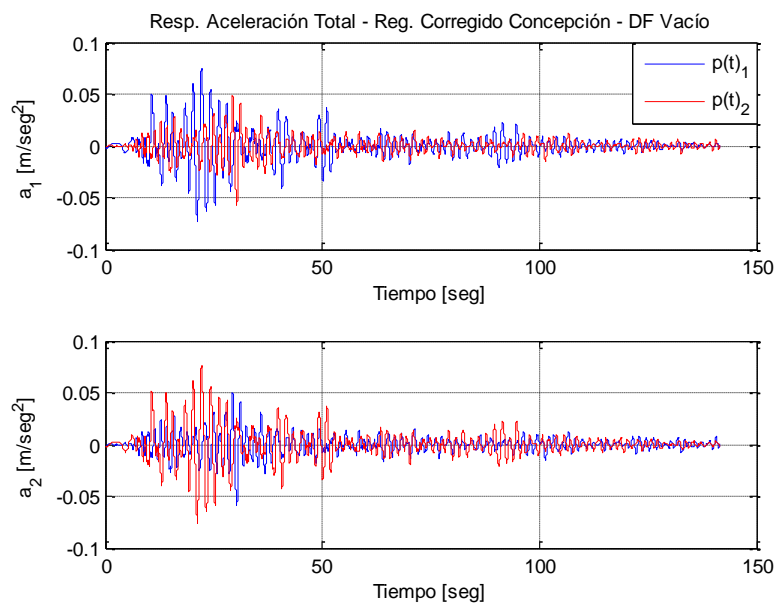


Figura IV-56: Aceleración total de dique flotante vacío

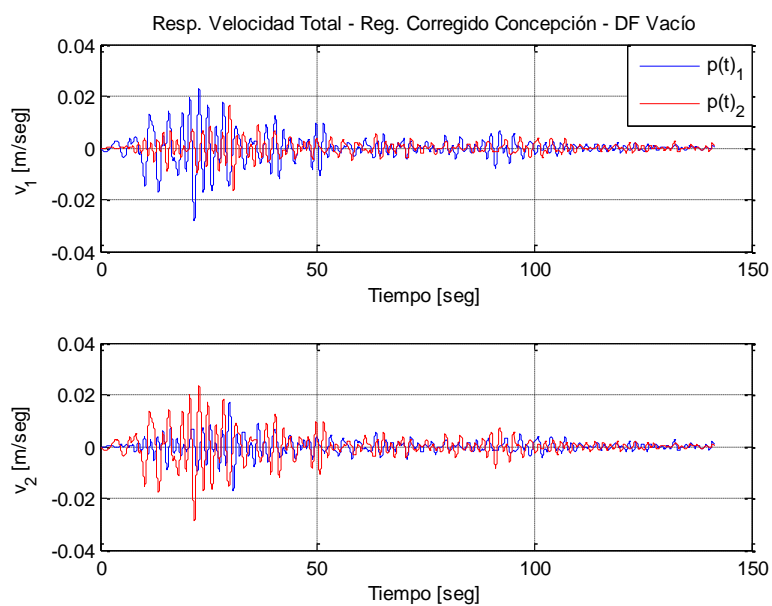


Figura IV-57: Velocidad total de dique flotante vacío

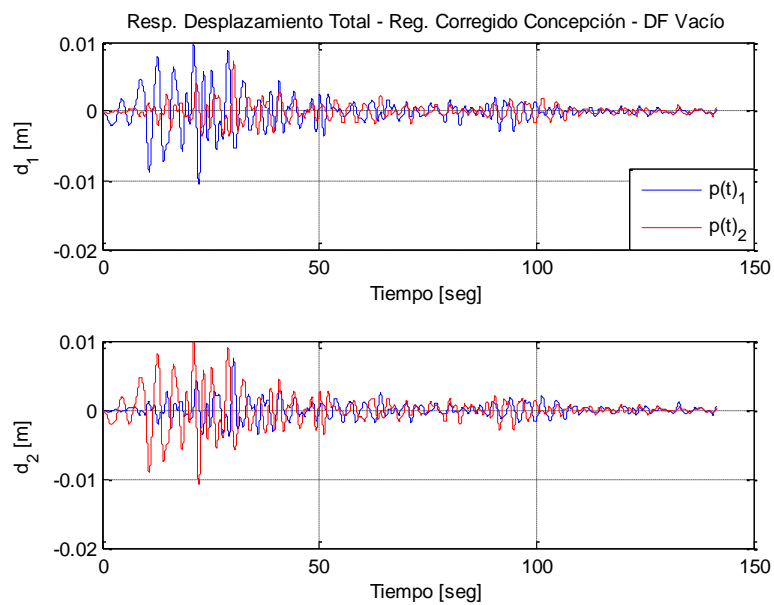


Figura IV-58: Desplazamiento total de dique flotante vacío

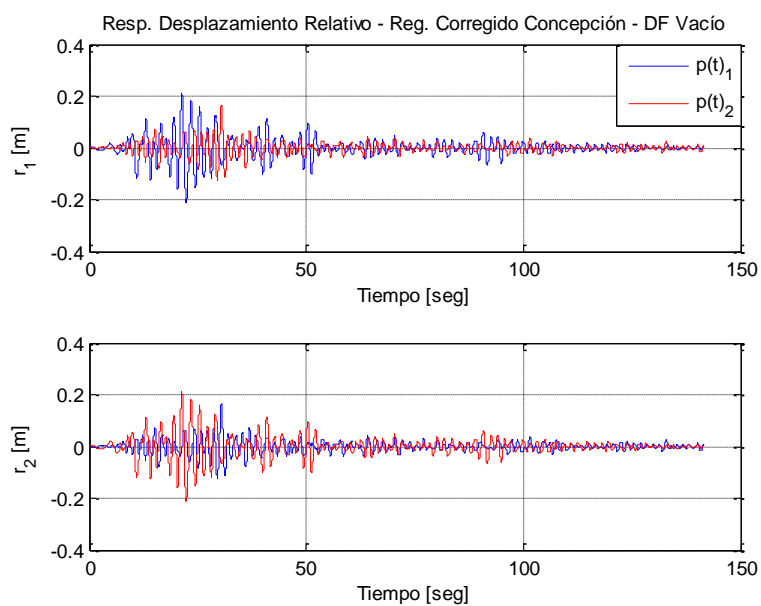


Figura IV-59: Desplazamiento relativo de dique flotante vacío

Tabla IV-XXXI: Desplazamientos relativos máximos de dique flotante vacío

r	p(t)	u_1 [m]	u_2 [m]	u_3 [rad]	$\text{sqrt}(u_1^2+u_2^2)$
max(u_1)	1	0.212	-0.013	0.00000084	0.213
max(u_2)	1	-0.065	0.163	-0.00000082	0.176
max(u_3)	1	0.083	-0.052	0.00000125	0.098
min(u_1)	1	-0.213	0.037	-0.00000115	0.216
min(u_2)	1	0.074	-0.126	0.00000051	0.147
min(u_3)	1	-0.119	0.031	-0.00000127	0.123
max(u_1)	2	0.163	-0.065	0.00000078	0.176
max(u_2)	2	-0.013	0.212	0.00000024	0.213
max(u_3)	2	0.153	-0.060	0.00000080	0.164
min(u_1)	2	-0.126	0.075	-0.00000034	0.147
min(u_2)	2	0.037	-0.213	0.00000021	0.216
min(u_3)	2	-0.079	0.115	-0.00000042	0.139

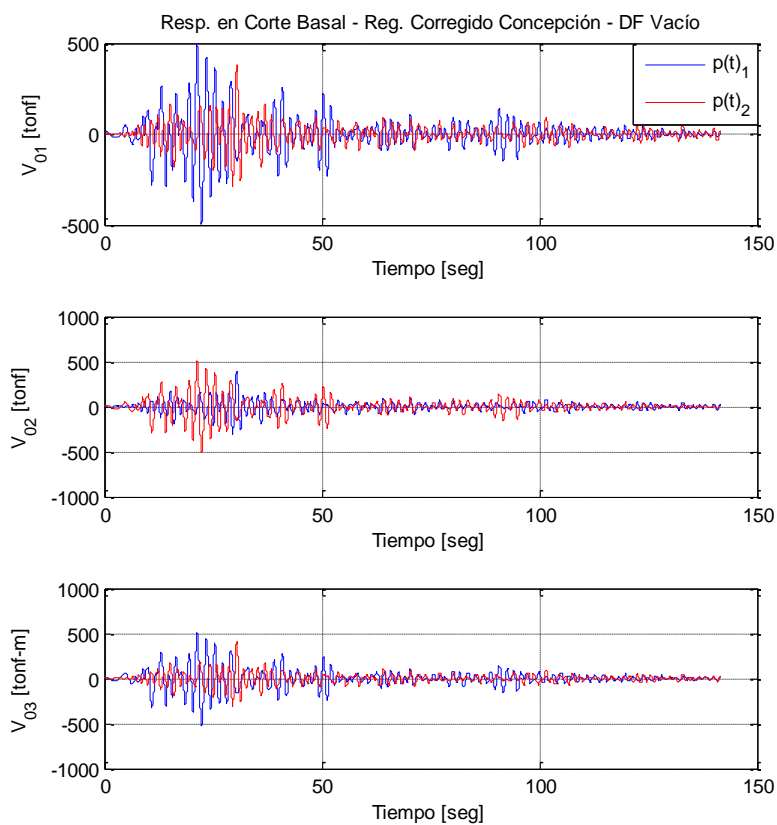


Figura IV-60: Corte basal con dique flotante vacío

Tabla IV-XXXII: Corte basal máximo de dique flotante vacío

Vo	p(t)	u ₁ [t]	u ₂ [t]	u ₃ [t-m]	sqrt(u ₁ ² +u ₂ ²)
max(u ₁)	1	492	-30	1494	493
max(u ₂)	1	-151	388	-546	417
max(u ₃)	1	492	-32	1496	493
min(u ₁)	1	-493	88	-1550	501
min(u ₂)	1	172	-301	589	347
min(u ₃)	1	-493	90	-1550	501
max(u ₁)	2	378	-155	1164	408
max(u ₂)	2	-30	505	-29	506
max(u ₃)	2	378	-155	1164	408
min(u ₁)	2	-293	177	-842	342
min(u ₂)	2	85	-507	266	514
min(u ₃)	2	-293	177	-843	342

j) Resumen de las respuestas obtenidas

El resumen de desplazamiento y corte basales máximos obtenidos para los registros base y corregido, en combinación con las condiciones del dique flotante vacío y cargado se presentan en las tablas siguientes:

Tabla IV-XXXIII: Resumen de respuesta de desplazamiento

Registro		Base		Corregido	
p(t)	r	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado
1	max(u ₁) [m]	0.573	0.536	0.213	0.208
1	max(u ₂) [m]	0.363	0.455	0.176	0.172
1	max(u ₃) [rad]	0.141	0.342	0.098	0.169
1	min(u ₁) [m]	0.318	0.670	0.216	0.211
1	min(u ₂) [m]	0.372	0.490	0.147	0.144
1	min(u ₃) [rad]	0.337	0.210	0.123	0.115
2	max(u ₁) [m]	0.369	0.440	0.176	0.172
2	max(u ₂) [m]	0.580	0.519	0.213	0.209
2	max(u ₃) [rad]	0.256	0.253	0.164	0.156
2	min(u ₁) [m]	0.372	0.493	0.147	0.144
2	min(u ₂) [m]	0.445	0.653	0.216	0.211
2	min(u ₃) [rad]	0.340	0.432	0.139	0.136

Tabla IV-XXXIV: Resumen de respuesta de corte basal

Registro		Base		Corregido	
p(t)	Vo	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado
1	max(u ₁) [t]	1328	1237	493	481
1	max(u ₂) [t]	859	1078	417	406
1	max(u ₃) [t-m]	325	564	493	481
1	min(u ₁) [t]	738	1551	501	488
1	min(u ₂) [t]	883	1153	347	338
1	min(u ₃) [t-m]	240	377	501	488
2	max(u ₁) [t]	861	1015	408	398
2	max(u ₂) [t]	1380	1230	506	494
2	max(u ₃) [t-m]	634	582	408	398
2	min(u ₁) [t]	865	1144	342	333
2	min(u ₂) [t]	1047	1542	514	500
2	min(u ₃) [t-m]	17	975	342	335

IV.2.9. Obtención de esfuerzos y deformaciones de diseño

Los esfuerzos y deformaciones de diseño de los pilotes, aisladores, vigas y losa de los dolphins se obtienen mediante las combinaciones de carga mostradas en las tablas IV-9 y IV-10.

IV.2.10. Verificación de demanda v/s capacidad de los aisladores

La verificación del aislador utilizado en los cuatro modelos analizados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV-XXXV: Verificación de demanda v/s capacidad de aisladores

Verificación de demanda v/s capacidad				
Registro	Base		Corregido	
Condición DF	Cargado	Vacío	Cargado	Vacío
D_{\max} (cm)	40.0	40.0	40.0	40.0
$D_{\text{calculado}}$ (cm)	21.8	21.0	21.0	21.0
$\checkmark D_{\text{calculado}} < D_{\max}$?	Sí	Sí	Sí	Sí

IV.2.11. Verificación de demanda v/s capacidad de los pilotes

La verificación de los pilotes utilizados en los cuatro modelos analizados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV-XXXVI: Verificación de demanda v/s capacidad de pilotes

Verificación de demanda v/s capacidad								
Registro	Base		Base		Corregido		Corregido	
Condición DF	Cargado		Vacío		Cargado		Vacío	
D_{ext} (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
t (mm)	18	22	18	22	18	22	18	22
L (cm)	3045	3045	3045	3045	3045	3045	3045	3045
K	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
F_y (Mpa)	350	350	350	350	350	350	350	350
F_u (Mpa)	457	457	457	457	457	457	457	457
A (cm ²)	555.3	675.9	555.3	675.9	555.3	675.9	555.3	675.9
I (cm ⁴)	669596	808572	669596	808572	669596	808572	669596	808572
W (cm ³)	13392	16171	13392	16171	13392	16171	13392	16171
r (cm)	34.7	34.59	34.7	34.59	34.7	34.59	34.7	34.59
KL/r	105.2	105.6	105.2	105.6	105.2	105.6	105.2	105.6
P_c (t)	769	930	769	930	769	930	769	930
M_c (t-m)	513	644	513	644	513	644	513	644
V_c (t)	489	595	489	595	489	595	489	595
$D-C_{F-C}$	0.935	0.881	0.868	0.812	0.851	0.774	0.868	0.774
$V_2/\phi_v V_n$	0.040	0.039	0.035	0.035	0.014	0.014	0.014	0.014
$V_3/\phi_v V_n$	0.050	0.044	0.050	0.044	0.050	0.044	0.050	0.044

IV.2.12. Comentarios

Si se comparan las respuestas máximas de desplazamiento del dique flotante, la respuesta del conjunto DF – dolphins con aisladores es mayor en un 36% respecto la calculada para el pre diseño.

Pese al aumento de la respuesta de desplazamiento del dique flotante, al comparar la respuesta de corte basal se observa que los aisladores en los dolphins permiten reducir hasta un 49% su magnitud respecto a la calculada para el pre diseño.

Finalmente, con la incorporación de aisladores sísmicos a los dolphins, el suministro de acero de pilotes requeridos para el proyecto representa un 71% de lo calculado para el pre diseño.

La disminución de costo del proyecto no alcanza la proporción indicada respecto al suministro de pilotes, debido a que se debe considerar el incremento de costo que representan los aisladores y a que se requieren vigas no consideradas en el pre diseño. Los aisladores deben quedar conectados a dos envigados, el superior que soporta la losa de cada dolphin y otro inferior que va conectado a los pilotes.

V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Pese a la extensa costa que posee nuestro país, la infraestructura marítima no se incluye expresamente en las normas actuales de diseño sísmico. La práctica ha llevado a que en los proyectos de puertos y obras marítimas que se han desarrollado hasta la fecha se utilice la definición de carga sísmica que se incluye en la norma NCh2369 de estructuras e instalaciones industriales.

A la luz de lo expresado en el primer párrafo, se entiende que no existan referencias o ayudas de diseño adaptadas a la realidad sísmica chilena, que permitan a los ingenieros dedicados a las estructuras marítimas enfrentarse a un proyecto que posea las características del caso de estudio analizado en este trabajo.

El análisis realizado en este trabajo y su aplicación al caso de estudio, da origen a la creación de un procedimiento de diseño sísmico adaptado a las características particulares de las estructuras marítimas que se requieren para fondear cualquier artefacto naval.

Este procedimiento considera como hipótesis básicas lo siguiente:

- El artefacto naval es mantenido en una posición deseada por una o más estructuras marítimas fijas al fondo marino a las que se encuentra conectado. A esta configuración se le denomina como “conjunto” o “sistema”.
- Por medio del agua, al artefacto naval no le son transmitidos los esfuerzos o movimientos producidos por un terremoto. El suelo y las obras de fondeo sí se ven afectadas por deformaciones inducidas por el terremoto. Por esta razón es que se

prefiere que el cálculo de la respuesta del sistema esté referido a un sistema de coordenadas totales.

- Las masas del artefacto naval y sus estructuras de fondeo se acoplan en el plano horizontal durante un movimiento sísmico por el hecho de estar conectadas.
- Debido a que el artefacto naval posee un desplazamiento que varía según su condición de carga, se debe tomar en cuenta que la masa total involucrada en el análisis no es fija.
- Comportamiento lineal elástico de los materiales.
- El artefacto naval se comporta como diafragma rígido horizontal.

La aplicación del procedimiento requiere de la existencia de registros de aceleraciones de sismos pasados medidos en el área del proyecto. En caso de que esto no esté disponible se sugiere utilizar registros sintéticos compatibles con el indicado en la norma NCh2369 o con espectros de sitio específicos obtenidos mediante estudios de riesgo sísmico del área del proyecto..

Los registros sísmicos disponibles permiten calcular la historia de la respuesta del conjunto, para lo cual se deben considerar tres grados de libertad con origen en su centro de masa. Dos grados de libertad corresponden a traslaciones en el plano horizontal y son ortogonales entre sí; el tercer grado de libertad es el giro sobre el eje vertical.

La respuesta de corte basal debe estimarse considerando la matriz de rigidez del conjunto y los desplazamientos relativos de la masa total respecto a la base (suelo). Para esto, se

requiere descontar a la respuesta de desplazamiento referida al sistema de coordenadas absoluto el movimiento del suelo producido por el sismo.

Del análisis del caso de estudio, los períodos fundamentales de vibración resultantes de los diseños preliminar y definitivo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla V-I: Períodos fundamentales de vibración [segundos]

Condición del dique flotante	Cargado		Vacío	
	u1	u2	u1	u2
Pre diseño (dolphins convencionales)	9.799	9.46	7.31	7.06
Diseño definitivo (dolphins equipados con aisladores sísmicos)	15.38	15.17	11.45	11.30

Los desplazamientos máximos medidos en el centro de masa del conjunto obtenidos en el análisis, se muestran en la tabla V-2. Estos valores son de similar orden de magnitud que los que pueden inferirse de los espectros de respuesta asociados al registro sísmico utilizado en el análisis de acuerdo a los períodos de vibración del proyecto.

Tabla V-II: Desplazamientos máximos [m]

Registro sísmico	Base		Corregido	
	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado
Pre diseño (dolphins convencionales)	47.4	53.1	23.4	22.1
Diseño definitivo (dolphins equipados con aisladores sísmicos)	58.0	67.0	21.6	21.1

Los cortes basales máximos que actúan sobre el centro de masa del conjunto calculados con el procedimiento propuesto en este documento, se muestran en la tabla V-3.

Tabla V-III: Corte basal máximo [t]

Registro sísmico	Base		Corregido	
	Vacío	Cargado	Vacío	Cargado
Pre diseño (dolphins convencionales)	2887	3051	1444	1349
Diseño definitivo (dolphins equipados con aisladores sísmicos)	1380	1551	514	500

Los valores de corte basal que podrían obtenerse para este caso de estudio, si se utiliza el espectro de diseño de aceleraciones de la norma NCh2369 (tipo de suelo III, zona sísmica 3, $\xi = 0.05$, $R = 1$; e $I = 1$), son los siguientes:

Tabla V-IV: Corte basal máximo según NCh2369 [t]

Parámetro	Pre diseño (dolphins convencionales)		Diseño definitivo (dolphins equipados con aisladores sísmicos)	
	Período de vibración, T^* [seg]	9.45	9.20	15.38
Peso sísmico, P [t]	136,025		135,827	
Coefficiente sísmico calculado (sin considerar exigencia de coeficiente mínimo de la norma), C	0.008	0.009	0.003	0.003
Corte basal, Q_0 [t]	1,111	1,165	461	473

De acuerdo a lo mostrado en la tabla V-4, la norma NCh2369 entrega valores inferiores a los calculados mediante el procedimiento propuesto en este documento, por lo que no resulta una herramienta útil para conocer el orden de magnitud de la carga sísmica, aún en etapas tempranas del proyecto.

La utilización de aisladores sísmicos en los dolphins presenta a lo menos dos ventajas respecto a la utilización de dolphins convencionales en este caso de estudio:

- La magnitud de la carga sísmica se reduce, lo que hace disminuir la brecha entre esta y las cargas producidas por condiciones meta-oceánicas. Sin embargo, la carga sísmica sigue siendo la mayor sollicitación en términos absolutos.
- El suministro de acero de pilotes corresponde a un 71% de lo requerido para los dolphins convencionales.

BIBLIOGRAFIA

PAZ, M. y LEIGH, W. (2004) *Structural Dynamics: Theory and Computation, Fifth Edition*. Kluwer Academic Publishers, USA.

CHOPRA, ANIL K. (2000) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Second Edition*. Prentice Hall, New Jersey.

SKINNER, R.I. et al (1993) *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, New Zeland.

KELLY, J. M. y NAEIM, F. (1999) *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons, USA.

TSINKER, GREGORY P. (2004) *Port Engineering: Planning, Construction, Maintenance, and Security, First Edition*. John Wiley & Sons, Canada.

GAYTHWAITE, JOHN W. (2004) *Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels, Second Edition*. ASCE Press, USA.

Unified Facilities Criteria UFC 4-152-01 *Design: Piers and Wharves*, 2005.

Unified Facilities Criteria UFC 4-159-03 *Design: Moorings*, 2005.

Recomendaciones para Obras Marítimas de España, ROM 2.0-11 (2012) *Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución en Obras de Atraque y Amarre*, 2012.

Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Portuarias, Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras, Primera Edición.

Instituto Nacional de Normalización, NCh2369, Diseño sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales, Chile, 2003.

Matías Hube, apuntes del curso EIG 3500 “Análisis Sísmico” (2013) del programa de magister en ingeniería estructural y geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Andrés Jacobsen, apuntes del curso EIG 3520 “Aislamiento Sísmico” (2013) del programa de magister en ingeniería estructural y geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile.

ANEXOS

ANEXO A: RUTINA MATLAB DE RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA

```

%% Respuesta de sistema de tres grados de libertad ante registro sísmico

% Sistema = artefacto flotante restringido por un grupo de mooring dolphins
% Fecha 24 de enero 2016

clc
clear
format short g

% Datos del sistema unidades: [tonf-m]
L=320; % eslora del artefacto flotante
B=75; % manga del artefacto flotante
m1=135960; % peso del conjunto en tonf (desplazamiento del DF más el grupo de
dolphins de amarre)
g=9.81; % m/seg^2, aceleración de gravedad

%% Matrices m, c y k que definen las propiedades del sistema

k=[5698.209212 -1.77074E-05 -5957.56527
-1.77074E-05 6113.918039 0.088463894
-5957.56527 0.088463894 86178972.34];% matriz de rigidez del sistema

m=[m1/g 0 0;0 m1/g 0;0 0 (m1/g)*(L^2+B^2)/12]; % matriz de masa del sistema

xi=0.05; % amortiguamiento del sistema

[phi,wn2]=eig(k,m)

wn=sqrt(wn2)

T=2*pi*inv(wn)

Mn=phi'*m*phi;

Cn=2*xi*Mn*wn; % matriz de amortiguamiento presente en ecuación de movimiento

c=inv(phi')*Cn*inv(phi);

Kn=phi'*k*phi;

%% Ecuación de movimiento

```

```

% m*vppt+c*vpt+k*vt=c*R*vp+g+k*R*vg

% subíndices t=total y g=suelo
% vppt = aceleración, vpt = velocidad, vt = desplazamiento
% vpg = velocidad del suelo
% vg = desplazamiento del suelo

%% Input

load('rec_27F_renadic_conce.mat');

% Registro base dirección transversal (no corregido)

% Dirección de análisis: componente L alineado con gdl 1
vpg_1l=0.01*v.L; % velocidad del suelo [m/seg] dirección paralela a eslora
vg_1l=0.01*d.L; % desplazamiento del suelo [m] dirección paralela a eslora
vpg_2l=0.01*v.T; % velocidad del suelo [m/seg] dirección paralela a manga
vg_2l=0.01*d.T; % desplazamiento del suelo [m] dirección paralela a manga

% Dirección de análisis: componente T alineado con gdl 1
vpg_1t=0.01*v.T; % velocidad del suelo [m/seg] dirección perpendicular a eslora
vg_1t=0.01*d.T; % desplazamiento del suelo [m] dirección perpendicular a eslora
vpg_2t=0.01*v.L; % velocidad del suelo [m/seg] dirección perpendicular a manga
vg_2t=0.01*d.L; % desplazamiento del suelo [m] dirección perpendicular a manga

R1=[1;0;0]; % vector que relaciona el input con gdl 1 (paralelo a eslora)
R2=[0;1;0]; % vector que relaciona el input con gdl 2 (paralelo a manga)

N=length(v.L); % Número de puntos del registro
dt=0.005; % variación de tiempo del registro (revisar archivo de Renadic)

% Vector de tiempo
t=0:dt:(N-1)*dt;

acel_1=zeros(3,N); % matriz para guardar inputs parte 1
acel_2=zeros(3,N); % matriz para guardar inputs parte 2

for i=1:3

acel_1(i,:)=phi(:,i)*(Mn\c)*R1*vpg_1l'+phi(:,i)*(Mn\c)*R2*vpg_2l'+phi(:,i)*(Mn\k)*R1
*vpg_1l'+phi(:,i)*(Mn\k)*R2*vpg_2l';
end

for i=1:3

```

```

acel_2(i,:)=phi(:,i)*(Mn\c)*R1*vgp_1t'+phi(:,i)*(Mn\c)*R2*vgp_2t'+phi(:,i)*(Mn\k)*R1
*vg_1t'+phi(:,i)*(Mn\k)*R2*vg_2t';
end

```

```

% Registros reales de aceleración del suelo

```

```

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,0.01*a.L,'b')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('a.L [m/seg^2]'); title('Aceleración del Suelo - Registro Base Concepción - Dique
Flotante Vacío');
grid on

```

```

subplot(2,1,2)
plot(t,0.01*a.T,'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('a.T [m/seg^2]');
grid on

```

```

% Registros de velocidad del suelo (primera integral de a.L y a.T)

```

```

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,0.01*v.L,'b')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('v.L [m/seg]'); title('Velocidad del Suelo - Registro Base Concepción - Dique
Flotante Vacío');
grid on

```

```

subplot(2,1,2)
plot(t,0.01*v.T,'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('v.T [m/seg]');
grid on

```

```

% Registros de desplazamiento del suelo (segunda integral de a.L y a.T)

```

```

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,0.01*d.L,'b')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('d.L [m]'); title('Desplazamiento del Suelo - Registro Base Concepción - Dique
Flotante Vacío');
grid on

```

```

subplot(2,1,2)
plot(t,0.01*d.T,'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('d.T [m]');
grid on

% Input creados para ecuación de movimiento en coordenadas totales (vt)

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,acel_1(1,:), 'b', t, acel_1(2,:), 'r', t, acel_1(3,:), 'c')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('p(t)_1 [m/seg^2]')
title('Componente L alineado con u_1 y T alineado con u_2 - Dique Flotante Vacío')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(t,acel_2(1,:), 'b', t, acel_2(2,:), 'r', t, acel_2(3,:), 'c')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('p(t)_2 [m/seg^2]')
title('Componente T alineado con u_1 y L alineado con u_2 - Dique Flotante Vacío')
grid on
legend('p(t)_i_1', 'p(t)_i_2', 'p(t)_i_3')

%% Respuesta del sistema en coordenadas absolutas

% Se utiliza análisis modal
%  $qpp(t)+2*\xi*wn*qp(t)+wn^2*q(t)=P(t)/Mn$ 

% Análisis sismo de componente longitudinal alineado con gdl 1
for i=1:3
    [vt1(i,:), vppt1(i,:), vppt1(i,:)] = interexcitsdf(dt, acel_1(i,:), xi, wn(i,i), Kn(i,i));
end

% Análisis sismo de componente transversal alineado con gdl 1

for i=1:3
    [vt2(i,:), vppt2(i,:), vppt2(i,:)] = interexcitsdf(dt, acel_2(i,:), xi, wn(i,i), Kn(i,i));
end

% Respuestas absolutas considerando actuación simultánea de las componentes L
% y T del sismo

d1=phi*vt1; d2=phi*vt2; v1=phi*vpt1; v2=phi*vpt2; a1=phi*vppt1; a2=phi*vppt2;

```

```

% Aceleración total de la masa (dique flotante)

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,a1(1,:), 'b', t, a2(1,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('a - u_1 [m/seg^2]')
title('Respuesta Aceleración Total - Registro Base Concepción - Dique Flotante Vacío')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(t,a1(2,:), 'b', t, a2(2,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('a - u_2 [m/seg^2]')
grid on
legend('p(t)_1', 'p(t)_2')

% Velocidad total de la masa (dique flotante)

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,v1(1,:), 'b', t, v2(1,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('v - u_1 [m/seg]')
title('Respuesta Velocidad Total - Registro Base Concepción - Dique Flotante Vacío')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(t,v1(2,:), 'b', t, v2(2,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('v - u_2 [m/seg]')
grid on
legend('p(t)_1', 'p(t)_2')

% Respuestas relativas considerando actuación simultánea de las componentes L
% y T del sismo

r1=d1+[0.01*d.L';0.01*d.T';zeros(1,N)]; % vt(t)=r(t)+[1]vg(t)
r2=d2+[0.01*d.T';0.01*d.L';zeros(1,N)];

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,d1(1,:), 'b', t, d2(1,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('d - u_1 [m]')
title('Respuesta Desplazamiento Total - Registro Base Concepción - Dique Flotante Vacío')

```



```

grid on

subplot(2,1,2)
plot(t,d1(2,:), 'b', t, d2(2,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('d - u_2 [m]')
grid on
legend('p(t)_1', 'p(t)_2')

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,r1(1,:), 'b', t, r2(1,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('r - u_1 [m]')
title('Respuesta Desplazamiento Relativo - Registro Base Concepción - Dique Flotante Vacío')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(t,r1(2,:), 'b', t, r2(2,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('r - u_2 [m]')
grid on
legend('p(t)_1', 'p(t)_2')

% Fuerza relativa asociada a cada grado de libertad (corte basal)

Vo_1=k*r1; Vo_2=k*r2;

figure
subplot(3,1,1)
plot(t,Vo_1(1,:), 'b', t, Vo_2(1,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('u_1 [tonf]')
title('Respuesta en Corte Basal - Registro Base Concepción - Dique Flotante Vacío')
grid on

subplot(3,1,2)
plot(t,Vo_1(2,:), 'b', t, Vo_2(2,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')
ylabel('u_2 [tonf]')
grid on

subplot(3,1,3)
plot(t,Vo_1(3,:), 'b', t, Vo_2(3,:), 'r')
xlabel('Tiempo [seg]')

```

```

ylabel('u_3 [tonf-m]')
grid on
legend('p(t)_1','p(t)_2')

%% Valores máximos de respuesta - sismo de componente L alineado con gdl 1

% Desplazamiento relativo
[maxr1_1,hx1]=max(r1(1,:)); % índice de valor máximo de desplazamiento relativo GDL 1
[maxr1_2,hx2]=max(r1(2,:)); % índice de valor máximo de desplazamiento relativo GDL 2
[maxr1_3,hx3]=max(r1(3,:)); % índice de valor máximo de desplazamiento relativo GDL 3

tmax_r1=[(hx1-1)*dt (hx2-1)*dt (hx3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
máximo
r1_max=[r1(1,hx1) r1(2,hx1) r1(3,hx1)
        r1(1,hx2) r1(2,hx2) r1(3,hx2)
        r1(1,hx3) r1(2,hx3) r1(3,hx3)]

[minr1_1,hn1]=min(r1(1,:)); % índice de valor mínimo de desplazamiento relativo GDL 1
[minr1_2,hn2]=min(r1(2,:)); % índice de valor mínimo de desplazamiento relativo GDL 2
[minr1_3,hn3]=min(r1(3,:)); % índice de valor mínimo de desplazamiento relativo GDL 3

tmin_r1=[(hn1-1)*dt (hn2-1)*dt (hn3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
mínimo
r1_min=[r1(1,hn1) r1(2,hn1) r1(3,hn1)
        r1(1,hn2) r1(2,hn2) r1(3,hn2)
        r1(1,hn3) r1(2,hn3) r1(3,hn3)]

% Corte basal
[maxVo_11,ix1]=max(Vo_1(1,:)); % índice de valor máximo de corte basal GDL 1
[maxVo_12,ix2]=max(Vo_1(2,:)); % índice de valor máximo de corte basal GDL 2
[maxVo_13,ix3]=max(Vo_1(3,:)); % índice de valor máximo de corte basal GDL 3

tmaxVo_1=[(ix1-1)*dt (ix2-1)*dt (ix3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
máximo
Vo_1max=[Vo_1(1,ix1) Vo_1(2,ix1) Vo_1(3,ix1)
        Vo_1(1,ix2) Vo_1(2,ix2) Vo_1(3,ix2)
        Vo_1(1,ix3) Vo_1(2,ix3) Vo_1(3,ix3)]

[minVo_11,in1]=min(Vo_1(1,:)); % índice de valor mínimo de corte basal GDL 1
[minVo_12,in2]=min(Vo_1(2,:)); % índice de valor mínimo de corte basal GDL 2
[minVo_13,in3]=min(Vo_1(3,:)); % índice de valor mínimo de corte basal GDL 3

tminVo_1=[(in1-1)*dt (in2-1)*dt (in3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
mínimo
Vo_1min=[Vo_1(1,in1) Vo_1(2,in1) Vo_1(3,in1)
        Vo_1(1,in2) Vo_1(2,in2) Vo_1(3,in2)]

```

```

Vo_1(1,in3) Vo_1(2,in3) Vo_1(3,in3)]

%% Valores máximos de respuesta - sismo de componente T alineado con gdl 1

% Desplazamiento relativo
[maxr2_1,jx1]=max(r2(1,:)); % índice de valor máximo de desplazamiento relativo GDL 1
[maxr2_2,jx2]=max(r2(2,:)); % índice de valor máximo de desplazamiento relativo GDL 2
[maxr2_3,jx3]=max(r2(3,:)); % índice de valor máximo de desplazamiento relativo GDL 3

tmax_r2=[(jx1-1)*dt (jx2-1)*dt (jx3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
máximo
r2_max=[r2(1,jx1) r2(2,jx1) r2(3,jx1)
        r2(1,jx2) r2(2,jx2) r2(3,jx2)
        r2(1,jx3) r2(2,jx3) r2(3,jx3)]

[minr2_1,jn1]=min(r2(1,:)); % índice de valor mínimo de desplazamiento relativo GDL 1
[minr2_2,jn2]=min(r2(2,:)); % índice de valor mínimo de desplazamiento relativo GDL 2
[minr2_3,jn3]=min(r2(3,:)); % índice de valor mínimo de desplazamiento relativo GDL 3

tmin_r2=[(jn1-1)*dt (jn2-1)*dt (jn3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
mínimo
r2_min=[r2(1,jn1) r2(2,jn1) r2(3,jn1)
        r2(1,jn2) r2(2,jn2) r2(3,jn2)
        r2(1,jn3) r2(2,jn3) r2(3,jn3)]

% Corte basal
[maxVo_21,kx1]=max(Vo_2(1,:)); % índice de valor máximo de corte basal GDL 1
[maxVo_22,kx2]=max(Vo_2(2,:)); % índice de valor máximo de corte basal GDL 2
[maxVo_23,kx3]=max(Vo_2(3,:)); % índice de valor máximo de corte basal GDL 3

tmaxVo_2=[(kx1-1)*dt (kx2-1)*dt (kx3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
máximo
Vo_2max=[Vo_2(1,kx1) Vo_2(2,kx1) Vo_2(3,kx1)
        Vo_2(1,kx2) Vo_2(2,kx2) Vo_2(3,kx2)
        Vo_2(1,kx3) Vo_2(2,kx3) Vo_2(3,kx3)]

[minVo_21,kn1]=min(Vo_2(1,:)); % índice de valor mínimo de corte basal GDL 1
[minVo_22,kn2]=min(Vo_2(2,:)); % índice de valor mínimo de corte basal GDL 2
[minVo_23,kn3]=min(Vo_2(3,:)); % índice de valor mínimo de corte basal GDL 3

tminVo_2=[(kn1-1)*dt (kn2-1)*dt (kn3-1)*dt] % instantes (seg) en que se produce cada
mínimo
Vo_2min=[Vo_2(1,kn1) Vo_2(2,kn1) Vo_2(3,kn1)
        Vo_2(1,kn2) Vo_2(2,kn2) Vo_2(3,kn2)
        Vo_2(1,kn3) Vo_2(2,kn3) Vo_2(3,kn3)]

```

```
Casos_Vo=[Vo_1max  
Vo_1min  
Vo_2max  
Vo_2min];
```

```
Casos_r=[r1_max  
r1_min  
r2_max  
r2_min];
```

```
xlswrite('Vo_Cargado_Base_102015.xls',Casos_Vo)  
xlswrite('r_Cargado_Base_102015.xls',Casos_r)
```


ANEXO B: RUTINA MATLAB DE INTEGRACIÓN DIRECTA

```

%% IEG4970 Actividad de Graduación
% 25 de julio 2014
% Prof. José Luis Almazán
% Autor: Carlos Rodríguez

%% Función que resuelve ecuación de mov. de sistemas lineales de 1 GDL
% Método de interpolación de la excitación, Capítulo 5 Chopra

% el input es vector tiempo t y el vector fuerza aplicada p

%% Definiciones

% u = vector de desplazamiento
% up = vector de velocidad
% upp = vector de aceleración
% xi = razón de amortiguamiento crítico
% wn = frecuencia natural de vibración (no amortiguada)
% wd = frecuencia natural de vibración amortiguada = wn*sqrt(1-xi^2)
% k = rigidez del sistema de 1 gdl
% m = masa = k/wn^2

% Ecuación de movimiento

%  $upp(t) + 2*xi*wn*up(t) + wn^2*u(t) = -ugpp(t)$ 

function [u,up,upp]=interexcitsdf(dt,ugpp,xi,wn,k)

p=-ugpp;

wd=wn*sqrt(1-xi^2);
N=length(p); % determinación de número de puntos del registro

u=zeros(N,1); % vector de desplazamiento
up=zeros(N,1); % vector de velocidad
upp=zeros(N,1); % vector de aceleración

u(1)=0; % desplazamiento inicial
up(1)=0; % velocidad inicial
upp(1)=0; % aceleración inicial

```

```

% Cálculo de coeficientes de fórmulas de recurrencia (xi<1)
% Tabla 5.2.1 de Chopra

A=exp(-xi*wn*dt)*((xi/sqrt(1-xi^2))*sin(wd*dt)+cos(wd*dt));
B=exp(-xi*wn*dt)*(sin(wd*dt)/wd);
C=(1/k)*((2*xi/(wn*dt))+exp(-xi*wn*dt)*(sin(wd*dt)*((1-2*xi^2)/(wd*dt)-xi/sqrt(1-
xi^2))-(1+2*xi/(wn*dt))*cos(wd*dt)));
D=(1/k)*(1-2*xi/(wn*dt)+exp(-xi*wn*dt)*(sin(wd*dt)*(2*xi^2-
1)/(wd*dt)+2*xi*cos(wd*dt)/(wn*dt)));
Ap=-exp(-xi*wn*dt)*(wn*sin(wd*dt)/sqrt(1-xi^2));
Bp=exp(-xi*wn*dt)*(cos(wd*dt)-xi*sin(wd*dt)/sqrt(1-xi^2));
Cp=(1/k)*(-1/dt+exp(-xi*wn*dt)*(sin(wd*dt)*(wn/sqrt(1-xi^2)+xi/(dt*sqrt(1-
xi^2)))+(1/dt)*cos(wd*dt)));
Dp=(1/(k*dt))*(1-exp(-xi*wn*dt)*(sin(wd*dt)*xi/sqrt(1-xi^2)+cos(wd*dt)));

for i=1:N-1
    u(i+1)=A*u(i)+B*up(i)+C*p(i)+D*p(i+1);
    up(i+1)=Ap*u(i)+Bp*up(i)+Cp*p(i)+Dp*p(i+1);
    upp(i+1)=p(i+1)-2*xi*wn*up(i+1)-wn^2*u(i+1);
end

end

```

ANEXO C: RUTINA MATLAB PARA MATRIZ DE RIGIDEZ K

```

%% Matriz de rigidez

% 23 de agosto 2015

clear
clc

% Matriz de masa del sistema

L=320; % eslora del artefacto flotante
B=75; % manga del artefacto flotante
g=9.81; % aceleración de gravedad en m/seg^2
m1=136311.4408; % masa del conjunto en tonf (desplazamiento del DF a full carga más
los 8 dolphins de amarre)
M=[m1/g 0 0;0 m1/g 0;0 0 (m1/g)*(L^2+B^2)/12]; % matriz de masa del sistema

% Matriz de desplazamientos provenientes de análisis modal

phi1=[0.008477 -2.534E-08 2.083E-08
-2.534E-08 -0.008477 7.952E-13
-0.000003147 8.197E-11 0.000089]; % Dique Flotante Cargado

% Matriz de periodos

T1=[19.22 0 0;0 19.18 0; 0 0 15.29]; % [segundos]

% Matriz de frecuencias angulares

wn1=2*pi*inv(T1); % [radianes/segundo]

% Matriz omega (wn^2)

wn12=wn1.^2;

% Matriz de rigidez

k11=M*phi1*wn12*inv(phi1)

```


$k1=(k11+k11')/2$ % matriz de rigidez forzada para ser simétrica

`xlswrite('k_Cargado_Aisl_2_V2.xls',k1)`

ANEXO D: RUTINA MATLAB DE ESPECTROS DE RESPUESTA

%% Espectro de Respuesta Elástico de un sistema de 1 GDL frente a un registro
% de aceleración dado, considerando varios amortiguamientos

% IEG 4970 Actividad de tesis

% Autor: Carlos Rodriguez

clc

clear

%% Definiciones

% u = vector de desplazamiento

% up = vector de velocidad

% upp = vector de aceleración

% xi = razón de amortiguamiento crítico

% wn = frecuencia natural de vibración (no amortiguada)

% wd = frecuencia natural de vibración amortiguada = $wn \cdot \sqrt{1-xi^2}$

% k = rigidez del sistema de 1 gdl

% m = masa = k/wn^2

% Ecuación de movimiento

% $upp(t) + 2 \cdot xi \cdot wn \cdot up(t) + wn^2 \cdot u(t) = -ugpp(t)$

%% Parámetros del sistema de 1 GDL

xi=0.05; % razón de amortiguamiento crítico

N=length(xi);

m=1; % masa de la estructura [ton-s²/cm]

T=0.01:0.05:20; % vector de periodo fundamental de vibración

wn=2*pi./T; % vector de frecuencia angular de vibración

k=m*wn.^2; % rigidez del sistema

load('rec_27F_renadic_conce.mat'); % carga el registro de aceleraciones

% Registro base (no corregido)

ugpp=a.T; % aceleración del suelo

M=length(T);

upppmax=zeros(M,N);

upmax=zeros(M,N);

umax=zeros(M,N);

```

for i=1:M
    dt=0.005;
    [u,up,upp]=interexcitsdf(dt,ugpp,xi,wn(i),k(i));
    umax(i)=max(abs(u));
    upmax(i)=max(abs(up));
    uppmax(i)=max(abs(upp));
end

% Gráficos registro base

figure
subplot(3,1,1)
plot(T,uppmax,'b')
xlabel('Periodo [seg]')
ylabel('SA [cm/seg^2]')
title('Espectros de Respuesta - Registro base Concepción (T)')
grid on

subplot(3,1,2)
plot(T,upmax,'b')
xlabel('Periodo [seg]')
ylabel('SV [cm/seg]')
grid on

subplot(3,1,3)
plot(T,umax,'b')
xlabel('Periodo [seg]')
ylabel('SD [cm]')
grid on

% % Registro corregido
%
% ugppc=a.Lc; % aceleración del suelo
% Mc=length(T);
% uppcmax=zeros(Mc,N);
% upcmax=zeros(Mc,N);
% ucmax=zeros(Mc,N);
%
% for j=1:N
%     for i=1:Mc
%         dt=0.005;
%         [uc,upc,uppc]=interexcitsdf(dt,ugppc,xi(j),wn(i),k(i));
%         ucmax(i,j)=max(abs(uc));
%         upcmax(i,j)=max(abs(upc));
%         uppcmax(i,j)=max(abs(uppc));
%     end

```

```

% end
%
% % Gráficos registro corregido
%
% figure
% subplot(3,1,1)
% plot(T,uppcmax(:,1),'m',T,uppcmax(:,2),'r',T,uppcmax(:,3),'b')
% xlabel('Periodo [seg]')
% ylabel('SA [cm/seg^2]')
% title('Espectros Elásticos de Respuesta - Registro corregido')
% grid on
%
% subplot(3,1,2)
% plot(T,upcmax(:,1),'m',T,upcmax(:,2),'r',T,upcmax(:,3),'b')
% xlabel('Periodo [seg]')
% ylabel('SV [cm/seg]')
% grid on
%
% subplot(3,1,3)
% plot(T,ucmax(:,1),'m',T,ucmax(:,2),'r',T,ucmax(:,3),'b')
% xlabel('Periodo [seg]')
% ylabel('SD [cm]')
% grid on
%
% % Gráficos comparativo de espectros de respuesta entre registros base y
% % corregido
%
% figure
% subplot(3,1,1)
% plot(T,uppmx(:,1)-uppcmax(:,1),'m',T,uppmx(:,2)-uppcmax(:,2),'r',T,uppmx(:,3)-
uppcmax(:,3),'b')
% xlabel('Periodo [seg]')
% ylabel('SA [cm/seg^2]')
% title('Comparación de Espectros Elásticos de Respuesta')
% grid on
%
% subplot(3,1,2)
% plot(T,upmax(:,1)-upcmax(:,1),'m',T,upmax(:,2)-upcmax(:,2),'r',T,upmax(:,3)-
upcmax(:,3),'b')
% xlabel('Periodo [seg]')
% ylabel('SV [cm/seg]')
% grid on
%
% subplot(3,1,3)
% plot(T,umax(:,1)-ucmax(:,1),'m',T,umax(:,2)-ucmax(:,2),'r',T,umax(:,3)-ucmax(:,3),'b')
% xlabel('Periodo [seg]')

```

```
% ylabel('SD [cm]')  
% grid on
```

ANEXO E: CONCEPTOS SOBRE AISLAMIENTO SÍSMICO

La aplicación de sistemas de aislamiento sísmico en el caso de estudio, como parte de una optimización de las estructuras portuarias obtenidas en un proceso inicial de diseño que no cuentan con esta protección, requiere de la revisión de algunos conceptos básicos para su utilización en este trabajo.

En este capítulo se exponen resumidamente la teoría de estructuras aisladas y las propiedades mecánicas de los aisladores elastoméricos.

E.1. Teoría lineal

Se asume una estructura aislada como la que se muestra en la figura E-1. Los desplazamientos del suelo se definen como \underline{u}_g , los desplazamientos del suelo con respecto de la base como \underline{q} y los desplazamientos de la superestructura con respecto de la base como \underline{u} . Los desplazamientos generalizados se definen como \underline{y} .

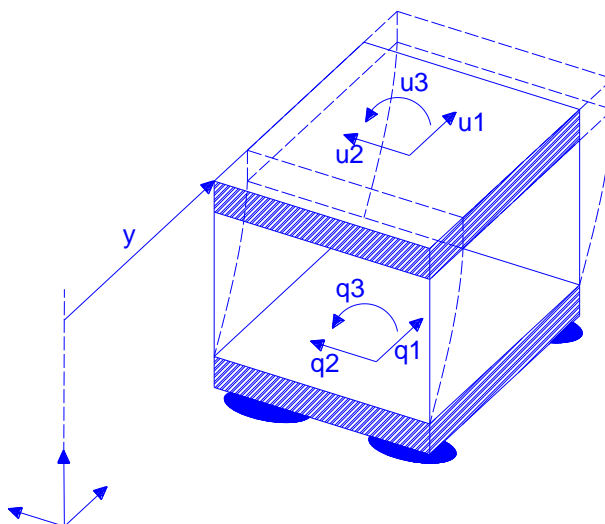


Figura E-1: isométrica de estructura aislada

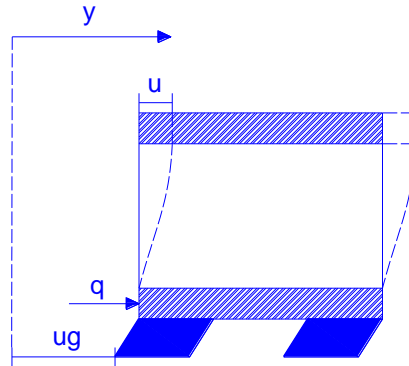


Figura E-2: elevación de estructura aislada

La cinemática del problema quedará de esta forma definida por la ecuación (E-1) donde \underline{r}_s es el vector de colocación de los movimientos de la base en la superestructura y \underline{r}_b es el vector de colocación del movimiento del suelo (\underline{u}_g) en la base.

$$\underline{y} = \underline{u} + \underline{r}_s \cdot (\underline{q} + \underline{r}_b \cdot \underline{u}_g) \quad (\text{E-1})$$

Si se asume que los centros de masa de cada uno de los pisos de la estructura están alineados en la dirección vertical, los vectores \underline{r}_s y \underline{r}_b son:

$$\underline{r}_s = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} \\ \vdots \\ I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (\text{E-2})$$

$$\underline{r}_b = \underline{I}_{3 \times 3}$$

Donde las matrices $\underline{I}_{3 \times 3}$ corresponden a matrices identidad para cada uno de los pisos. El principio de Acción-Deformación se aplica asumiendo que los aisladores se comportan en forma lineal.

$$\underline{f}_s = \underline{K}_s \cdot \underline{u} \quad (\text{E-3})$$

$$\underline{f}_d = \underline{C}_s \cdot \underline{\dot{u}} \quad (\text{E-4})$$

El equilibrio dinámico de la estructura se resuelve mediante el método del trabajo virtual según la ecuación (4-5)

$$\delta W_{ext} = \delta W_{int} \quad (\text{E-5})$$

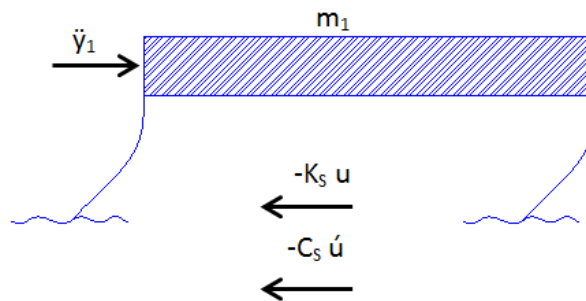


Figura E-3: diagrama de cuerpo libre de la superestructura

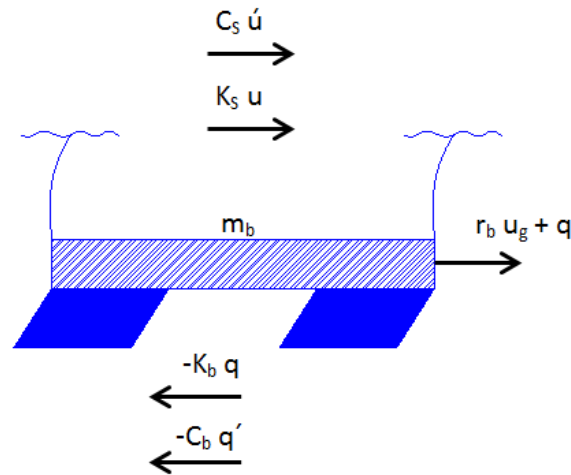


Figura E-4: diagrama de cuerpo libre de la base

Para formular las ecuaciones del movimiento se separa la estructura en dos partes. En primer lugar se analiza la superestructura de acuerdo a la figura E-3. El principio de los trabajos virtuales indica:

$$\underline{m}_s \cdot \ddot{\underline{y}} = \underline{F}_{ext} = -\underline{K}_s \cdot \underline{u} - \underline{C}_s \cdot \dot{\underline{u}} \quad (\text{E-6})$$

Y reemplazando la ecuación (E-1) en la ecuación (E-6) se obtiene:

$$\underline{m}_s \cdot \left(\ddot{\underline{u}} + \underline{r}_s \cdot \ddot{\underline{q}} + \underline{r}_s \cdot \underline{r}_b \cdot \ddot{\underline{u}}_g \right) + \underline{C}_s \cdot \dot{\underline{u}} + \underline{K}_s \cdot \underline{u} = 0 \quad (\text{E-7})$$

El caso de la base se resuelve de forma análoga como lo muestra la figura E-4. Se procede a realizar el equilibrio de trabajo y a reemplazar en la ecuación (E-6), obteniendo:

$$\underline{m}_b \cdot (\underline{\ddot{q}} + \underline{r}_b \cdot \underline{\ddot{u}}_g) + \underline{C}_b \cdot \underline{\dot{q}} + \underline{K}_b \cdot \underline{q} + (-\underline{r}_s^T \cdot (\underline{C}_s \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{K}_s \cdot \underline{u})) = 0 \quad (\text{E-8})$$

Donde el vector $-\underline{r}_s^T \cdot (\underline{C}_s \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{K}_s \cdot \underline{u})$ corresponde al corte basal total. Si se despeja el término $\underline{C}_s \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{K}_s \cdot \underline{u}$ de la ecuación (E-7) y se reemplaza en la ecuación (E-8), se obtiene:

$$\underline{m}_s \cdot \underline{\ddot{u}} + \underline{C}_s \cdot \underline{\dot{u}} + \underline{K}_s \cdot \underline{u} = -\underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \cdot \underline{\ddot{q}} - \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \cdot \underline{r}_b \cdot \underline{\ddot{u}}_g \quad (\text{E-9})$$

$$(\underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s + \underline{m}_b) \cdot \underline{\ddot{q}} + \underline{C}_b \cdot \underline{\dot{q}} + \underline{K}_b \cdot \underline{q} = -\underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \cdot \underline{\ddot{u}} - (\underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s + \underline{m}_b) \cdot \underline{r}_b \cdot \underline{\ddot{u}}_g \quad (\text{E-10})$$

En la ecuación (E-9) se puede observar que el término $-\underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \cdot \underline{\ddot{q}}$ corresponde al input debido al movimiento de la base, mientras que el término $\underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \cdot \underline{r}_b \cdot \underline{\ddot{u}}_g$ corresponde al input debido al movimiento del suelo. Finalmente, se puede expresar el problema en su forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \underline{m}_s & \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \\ \underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s & \underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s + \underline{m}_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\ddot{u}} \\ \underline{\ddot{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{C}_s & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{C}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\dot{u}} \\ \underline{\dot{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{K}_s & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{K}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{q} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \\ \underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s + \underline{m}_b \end{bmatrix} \cdot \underline{r}_b \cdot \underline{\ddot{u}}_g \quad (\text{E-11})$$

Donde el término $\underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s + \underline{m}_b$ representa la masa total de la estructura (\underline{m}_t). Además, la matriz de masa de la estructura resulta llena y el término de acoplamiento es $\underline{m}_s \cdot \underline{r}_s$. Este método, permite construir fácilmente la matriz de amortiguamiento

del conjunto conocimiento únicamente dichas matrices para la superestructura y la base.

El problema descrito en la ecuación (E-11) se puede solucionar en forma exacta, pero resulta interesante mirarlo a través de una aproximación en la que se considera a una superestructura rígida en la ecuación (E-10), vale decir:

$$\underline{u} = \underline{0}$$

Si $\underline{u} = \underline{0}$, $\underline{\dot{u}} = \underline{0}$ y $\underline{\ddot{u}} = \underline{0}$, la ecuación (E-10) se reduce a:

$$\underline{m}_t \cdot \underline{\ddot{q}} + \underline{C}_b \cdot \underline{\dot{q}} + \underline{K}_b \cdot \underline{q} = -\underline{m}_t \cdot \underline{r}_b \cdot \underline{\ddot{u}}_g \quad (\text{E-12})$$

La ecuación (E-12) solo depende de los grados de libertad de la base (q), con lo que se rompe la interacción entre ambos sistemas y es posible integrar (E-10) sin conocer el comportamiento de la superestructura. De la integración de (E-10) se obtiene la respuesta en el tiempo de la base ($\underline{q}(t)$, $\underline{\dot{q}}(t)$ y $\underline{\ddot{q}}(t)$). Luego se puede reemplazar $\underline{\ddot{q}}(t)$ en la ecuación (E-9) y resolver para \underline{u} . Finalmente, de (E-9) se obtienen los valores de la respuesta de la superestructura ($\underline{u}(t)$, $\underline{\dot{u}}(t)$ y $\underline{\ddot{u}}(t)$). Con los resultados obtenidos, se puede retomar la ecuación (E-10) y reemplazar los valores de $\underline{\ddot{u}}(t)$ como input y obtener $\underline{q}(t)$, $\underline{\dot{q}}(t)$ y $\underline{\ddot{q}}(t)$ e iterar. Este método se conoce como iteración dinámica y refleja la interacción entre ambos bloques de ecuaciones.

La figura E-5 presenta un diagrama de flujo con la forma de seguir este método:

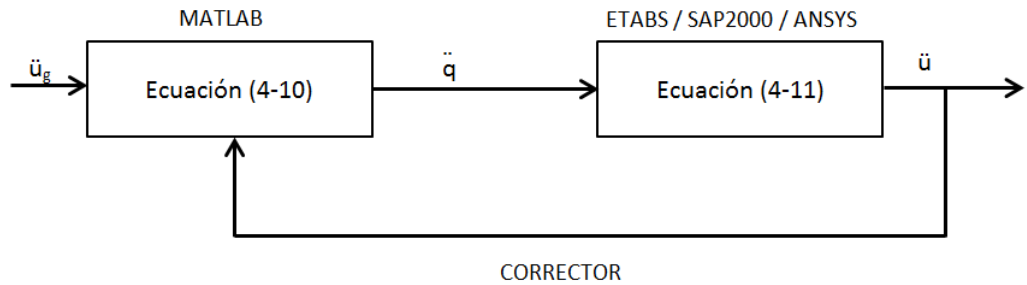


Figura E-5: diagrama de flujo del método de iteración dinámica

También se puede resolver la ecuación (E-10) de forma exacta. La ecuación se puede reescribir como:

$$\ddot{\underline{q}} = -\underline{m}_t^{-1} \cdot (\underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \cdot \ddot{\underline{u}}) - \underline{m}_t^{-1} \cdot \underline{m}_t \cdot \underline{r}_b \cdot \ddot{\underline{u}}_g - \underline{m}_t^{-1} \cdot \underline{C}_b \cdot \dot{\underline{q}} - \underline{m}_t^{-1} \cdot \underline{K}_b \cdot \underline{q} \quad (\text{E-13})$$

Ahora, reemplazando (E-13) en (E-9) se obtiene:

$$\left(\underline{m}_s - \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \cdot \underline{m}_t^{-1} \cdot \underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s \right) \cdot \ddot{\underline{u}} + \underline{C}_s \cdot \dot{\underline{u}} + \underline{K}_s \cdot \underline{u} = \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \cdot \underline{m}_t^{-1} \cdot \left(\underline{C}_b \cdot \dot{\underline{q}} + \underline{K}_b \cdot \underline{q} \right) \quad (\text{E-14})$$

Donde el término $\underline{m}_s - \underline{m}_s \cdot \underline{r}_s \cdot \underline{m}_t^{-1} \cdot \underline{r}_s^T \cdot \underline{m}_s$ se conoce como la matriz de masa corregida por la interacción dinámica ($\underline{\tilde{m}}_s$). Además, el término $\underline{C}_b \cdot \dot{\underline{q}} + \underline{K}_b \cdot \underline{q}$ representa el input de la superestructura, expresado únicamente en términos de la respuesta de la base.

De esta solución se pueden sacar varias observaciones:

- El input $\underline{q}(t)$ y $\underline{\dot{q}}(t)$ presentan frecuencias fundamentales del sistema aislado y, por lo tanto, se caracterizan por pulsos largos (de 2 a 3 segundos) y velocidades bajas.
- La interacción dinámica entre ambos sistemas se refleja en la corrección de la masa de la superestructura

$$\underline{m}_s \rightarrow \underline{\tilde{m}}_s$$

Donde $\underline{\tilde{m}}_s < \underline{m}_s$ pues se resta masa según la ecuación (E-14).

- Finalmente como \underline{K}_s es idéntico al de la estructura de base fija y $\underline{\tilde{m}}_s < \underline{m}_s$, las frecuencias fundamentales de la superestructura serán más altas para el caso aislado que para el caso de base fija.

E.2. Propiedades mecánicas de aisladores elastoméricos

La propiedad mecánica más importante de los aisladores es, por supuesto, su rigidez horizontal, la cual puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$K_H = \frac{G \cdot A}{t_r} \quad (\text{E-15})$$

En que:

G = módulo de corte del elastómero, el cual depende de la deformación de corte de la goma (cada fabricante tiene su propia expresión de la función $G(\gamma)$, cuya expresión general que la relaciona con el módulo de elasticidad es,

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

E = módulo de elasticidad de la goma, $E \approx 3 \cdot G$

ν = módulo de Poisson de la goma, igual a 0.4997

A = sección transversal de la goma del aislador

t_r = espesor total de la goma del aislador

El desplazamiento máximo horizontal del aislador está relacionado a su deformación de corte máxima γ_s mediante la expresión:

$$\gamma_s = \frac{D}{t_r} \quad (\text{E-16})$$

El factor de forma S se define como el cociente entre el área cargada y el área libre de hinchamiento del aislador.

Por ejemplo, para una franja infinita de ancho $2b$ y espesor de una lámina de goma igual a t , el factor de forma corresponde a:

$$S = \frac{b}{t} \quad (\text{E-17})$$

Un aislador anular de radio exterior R , radio interior r y espesor de una lámina de goma igual a t , su factor de forma es igual a:

$$S = \frac{R-r}{2 \cdot t} \quad (\text{E-18})$$

El factor de forma S de un aislador cuadrado de lado a y espesor t corresponde a:

$$S = \frac{a}{4 \cdot t} \quad (\text{E-19})$$

La fórmula (E-20) permite estimar la rigidez vertical del aislador:

$$K_v = \frac{E_c \cdot A}{t_r} \quad (\text{E-20})$$

En que:

A = área de la sección transversal del aislador. Usualmente se considera el área de las placas de acero que componen el aislador

E_c = módulo efectivo en compresión del aislador (bajo el nivel especificado de carga vertical)

La expresión para estimar E_c de un aislador cuadrado es:

$$E_c = 6.73 \cdot G \cdot S^2 \quad (\text{E-21})$$

Para un aislador circular, E_c es:

$$E_c = 6 \cdot G \cdot S^2 \quad (\text{E-22})$$

Para aisladores anulares de radio exterior b y radio interior a , E_c se obtiene mediante la expresión:

$$E_c = 6 \cdot \lambda \cdot G \cdot S^2 \quad (\text{E-22})$$

$$\lambda = \frac{b^2 + a^2 - \left[\frac{(b^2 - a^2)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \right]}{(b - a)^2} \quad (\text{E-23})$$

En general, el módulo efectivo en compresión de un aislador puede ser expresado como:

$$E_c = (1 + 2 \cdot k \cdot S^2) \cdot E \quad (\text{E-24})$$

En que:

k = factor de corrección por la geometría del aislador, se considera igual a 1

La deformación de corte en la goma inducida por la carga vertical sobre el aislador se estima mediante las expresiones siguientes:

$$\gamma_c = 6 \cdot S \cdot \varepsilon_c \quad (\text{E-25})$$

En que:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma}{E_c} \quad (\text{E-26})$$

$$\sigma = \frac{P_{ST}}{A_{eff}} \quad (\text{E-27})$$

P_{ST} = carga vertical máxima posible sobre el aislador, correspondiente a la combinación de corto plazo definida en el artículo 14.2.6 de la normativa NCh2745
($P_{ST} = 1.2D + L + |E|$)

A_{eff} = área de la columna efectiva sobre la cual actúa la carga P_{ST} como resultado de la deformación sufrida por el aislador, la que puede estimar mediante la expresión siguiente, referida a la figura E-6:

$$A_{eff} = \frac{1}{2} \cdot \left[D_{ext}^2 \cdot a \sin \left(\frac{\sqrt{D_{ext}^2 - D^2}}{D_{ext}} \right) - D \cdot \sqrt{D_{ext}^2 - D^2} \right] \quad (E-28)$$

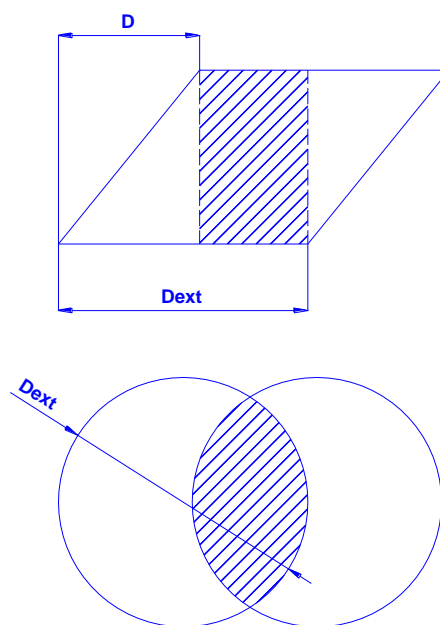


Figura E-6: vistas en elevación y planta de aislador en posición deformada

Por último, para el diseño del aislador se debe cumplir la siguiente condición:

$$\gamma_0 = \gamma_s + \gamma_c \leq \frac{0.85 \cdot \varepsilon_b}{FS} \quad (E-29)$$

En que:

FS = factor de seguridad igual a 1.5

ε_b = deformación unitaria de rotura de la goma, generalmente en el rango $5 < \varepsilon < 7$
(depende del fabricante)