



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Modelado numérico y análisis dinámico de una estructura flotante de hormigón.

Trabajo realizado por:

Patricia Sánchez de la Vega

Dirigido:

Alfonso Jurado Fuentes

Raúl Guanche García

José Antonio Armesto

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos**

Santander, septiembre de 2017

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Modelado numérico y análisis dinámico de una estructura flotante de hormigón

Trabajo realizado por:

Patricia Sánchez de la Vega

Dirigido por:

Alfonso Jurado Fuentes

José Antonio Armesto

Raúl Guanche García

Titulación:

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Santander, septiembre de 2017

Palabras clave:

Ten-shores, jaula, acuicultura, flotante, calibración, validación, modelo numérico, damping, placa de heave, oleaje, CCOB, IHCantabria

Resumen

El desarrollo y la mejora de jaulas offshore como sistemas de cultivo es uno de los factores más importantes para el crecimiento de la industria de la acuicultura offshore. Desde hace varios años, los diseñadores y las empresas están desarrollando diferentes conceptos de jaulas de acuicultura offshore, dando lugar a tecnologías singulares que buscan la mejor estructura acuícola desde el punto de vista del comportamiento en la mar de la estructura, del cultivo para el que se ha diseñado la estructura y económico (por su construcción, transporte, instalación, operación y mantenimiento).

El presente trabajo fin de máster presenta el análisis hidrodinámico de un nuevo concepto, diseñado y desarrollado especialmente por IHCantabria, de una jaula de acuicultura offshore

(dispositivo Ten-Shores) capaz de soportar las condiciones meteoceánicas en alta mar sin perjudicar al cultivo y facilitando su operación y mantenimiento.

Diseñar una estructura capaz de soportar las condiciones meteoceánicas en mar abierto y a la vez cumplir con su funcionalidad es una tarea que no sería posible sin la experimentación previa de ese modelo a escala laboratorio.

Sin embargo, las campañas de ensayos suponen costes económicos que hacen inviable que se pueda analizar una estructura para todos los posibles estados de mar de todas las posibles localizaciones en las que situarla. Por esta razón, es necesaria una herramienta numérica capaz de predecir el comportamiento de dicha estructura bajo cualquier estado de mar, ahorrando tanto costes económicos como tiempo. Esta herramienta numérica necesita ser calibrada y validada con ciertos ensayos experimentales significativos para comprobar que se ajusta a la realidad.

Por ello, el objetivo principal del presente trabajo fin de máster es la calibración y validación de una herramienta numérica capaz de representar el comportamiento del dispositivo Ten-Shores bajo diferentes condiciones meteoceánicas. Para ello, se ha contado con una base de datos obtenida a partir de la caracterización experimental de la jaula offshore diseñada mediante ensayos bajo diferentes condiciones de oleaje.

El dispositivo Ten-Shores es una estructura flotante de hormigón con un buen comportamiento hidrodinámico capaz de amortiguar los movimientos producidos por el oleaje, viento y corriente. El objetivo de este prototipo de jaula es el cultivo en mar abierto de especies de peces de un alto valor económico, como alternativa a la acuicultura en la costa y a la pesca tradicional, haciendo posible en este caso, aportar una solución ingenieril sostenible al consumo de pescado.

Los investigadores del IHCantabria del Grupo de Ingeniería Offshore y Energías Marinas han desarrollado un modelo numérico acoplado capaz de analizar movimientos de la estructura bajo el efecto de diferentes condiciones meteoceánicas (oleaje, viento y corriente), y como estas condiciones producen el propio movimiento de la estructura, fuerzas sobre las líneas de fondeo y fuerzas sobre los tendones que soportan el lastre del sinker que da rigidez a la red de contención de especies de peces.

Debido al gran coste computacional que supone resolver un modelo numérico completo, se han realizado ciertas simplificaciones para llegar a una ecuación capaz de simular el comportamiento del dispositivo en el mar en un periodo de tiempo de simulación razonable. Por esta razón, se han empleado unos coeficientes de calibración necesarios para suplir la presencia de efectos importantes que sí estarán presentes en la realidad, como es el caso de la inclusión de unos términos denominados coeficientes de amortiguamiento o damping que tratan de compensar las simplificaciones realizadas. Lo que se pretende conseguir con la introducción de estos coeficientes, cuya calibración previa mediante ensayos de laboratorio es necesaria, es acercarnos más a lo que pueda ser la realidad física del comportamiento de la estructura multicuerpo.

La geometría del dispositivo está formada por dos cuerpos, jaula y sinker (lastre para dar tensión a la red de contención de peces), unidos mediante el sistema de tendones. El coste computacional de la resolución del modelo para la interacción de dos cuerpos que se mueven independientemente es mucho mayor que la de un solo cuerpo. Si a esto se le suma la resolución del modelo dinámico del sistema de fondeo y de tendones, la duración de las simulaciones es mucho mayor. Por este motivo se ha estudiado también el análisis de la estructura como un sólido rígido, es decir; la jaula, el sinker y los tendones forman un único cuerpo. De esta forma se han podido comparar los resultados obtenidos de cada simulación y justificar si se podría o no utilizar un modelo simplificado para representar el comportamiento en el mar de esta estructura en simulaciones preliminares, pudiendo usar el modelo dinámico en las simulaciones en las que sea necesario por requerimiento de diseño o de normativa.

En primer lugar, se han calibrado los ensayos de extinción, con el objetivo de obtener los valores de los coeficientes de amortiguamiento y masa añadida que mejor ajusten el modelo numérico. En estos ensayos se han obtenido muy buenos resultados, coincidiendo en todo momento tanto las simulaciones de la estructura multicuerpo como las de sólido rígido.

Posteriormente se han recalibrado los coeficientes de amortiguamiento obtenidos en los ensayos de extinción para ajustarse mejor a los oleajes regulares. En esta etapa, debido al mayor coste computacional que requieren las simulaciones de la estructura multicuerpo, ya que la duración de las simulaciones es mucho mayor que las de los ensayos de extinción, los resultados obtenidos para esta configuración no han sido tan buenos como los obtenidos con sólido rígido. Sin embargo, se puede comprobar cómo se comportan de igual manera a falta de mejorar en cierta medida el ajuste de la amplitud. Dada la singularidad de la estructura, se han obtenido tres combinaciones de coeficientes de amortiguamiento, una por cada configuración de oleaje regular; a diferencia de otros modelos en los que son únicos para cualquier estado de mar.

Por último, se han validado las series de oleaje irregular, en las que se ha conseguido un buen ajuste a pesar de la singularidad ya resaltada de la estructura y las no linealidades presentes en los ensayos de laboratorio.

En general, se considera que la calibración y validación realizadas durante la elaboración de este trabajo fin de máster cumplen satisfactoriamente los objetivos previstos. Se ha conseguido obtener un modelo numérico calibrado capaz de representar de forma bastante aproximada el movimiento del dispositivo, al igual que las tensiones en el sistema de fondeo y tendones, bajo cualquier estado de mar. Aunque el modelo presenta ciertas limitaciones en algunos casos, se han detectado los problemas y se han propuesto como aspectos de mejora para ser estudiados en futuras investigaciones con la idea de solventarlos.

Numerical modeling and dynamic analysis of a floating concrete structure

Project made by:

Patricia Sánchez de la Vega

Directed by:

Alfonso Jurado Fuentes

José Antonio Armesto

Raúl Guanche García

University degree:

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Santander, septiembre de 2017

Key words:

Ten-shores, cage, aquaculture, floating, calibration, validation, numerical model, damping, heave plate, waves, CCOB, IHCantabria

Abstract

The development and improvement of offshore cages as cropping systems is one of the most important factors for the growth of offshore aquaculture industry. From several years now, designers and companies have been developing different concepts of offshore aquaculture cages, giving rise to singular technologies that look for the best aquaculture structure from the point of view of the behavior of the structure in the sea, the crop for which the structure has been designed and economic (because of its construction, transportation, installation, operation and maintenance).

The present master's thesis presents the hydrodynamic analysis of a new concept, specially designed and developed by IHCantabria, of an offshore aquaculture cage (Ten-Shores device)

which is able to withstand meteo-oceanic offshore conditions without harming the crop and facilitating its operation and maintenance.

Designing a structure which is able to withstand meteoceanic offshore conditions and fulfilling its functionality at the same time, is a task that would not be possible without previous experimentation of this model in laboratory scale. However, testing campaigns involve economic costs that make it impossible to analyze a structure in every possible sea states. For this reason, it is necessary a numerical tool which is able to predict the behavior of this structure under any sea state, saving both economic costs and time. This numerical tool should be calibrated and validated with some experimental tests to verify that it really fits the reality.

For this reason, the main objective of the present master's thesis is the calibration and validation of numerical tools and the verification of the technical feasibility of the design achieved in the TEN-SHORES project. For this, a database was obtained from experimental characterization of the design in tests, carried out in the Cantabria Coastal and Ocean Basin (CCOB) of the IHCantabria, that register the hydrodynamic response of the device against different conditions.

Ten-Shores device is a floating concrete structure with good hydrodynamic behavior to damp the movements produced by waves, wind and currents; thanks to its geometry, mass distribution and the use of a heave plate, to improve its behavior in this degree of freedom. The objective of this prototype cage is the offshore cropping of fish species of high economic value as an alternative to coastal aquaculture and traditional fishing.

Researchers from the offshore engineering and marine renewable group of IHCantabria have developed a double-coupled numerical model that is able to analyze structure movements under different meteo-oceanic conditions (waves, wind and currents), forces on the mooring lines and forces on the tendons that give rigidity to the fish species network.

Due to high computational cost of solving a complete numerical model, certain simplifications have been made in order to achieve an equation capable of simulating the behavior of the device at sea in a reasonable period of time. For this reason, calibration coefficients have been used to overcome the presence of important effects that will be present in reality, by including terms called damping coefficients that try to compensate for the simplifications performed. What is intended to be achieved with the introduction of these coefficients, which will be necessary to calibrate with laboratory tests, is to get closer to what may be the reality in the behavior of the body.

The model consists of two bodies, cage and sinker, joined by a tendon system. The computational cost of resolving the model for the interaction of two bodies that move indistinctly is much greater than that of a single body. If to this is added the resolution of the dynamic model of the mooring system and tendons, the duration of the simulations is much greater. For this reason we have also studied the analysis of the structure as a rigid solid, ie; the cage, sinker and tendons form a single body. In this way we have been able to compare the results obtained from each simulation and to justify whether or not we could use a simplified model to represent the behavior at sea of this structure.

First, extinction tests have been calibrated, in order to obtain the values of the damping and mass coefficients that best fit the numerical model. In these tests it has been obtained very good results, coinciding at all times both the simulations of the multibody structure and the rigid solid.

Subsequently, damping coefficients obtained in the extinction tests have been recalibrated to better adjust to regular waves. At this stage, due to the higher computational cost required by the multibody structure simulations, since the duration of the simulations is much longer than the extinction tests, the results obtained for this configuration have not been as good as those obtained with rigid solid. However, you can see how they behave in the same way though amplitude needs to be improved. Given the uniqueness of the structure, three combinations of damping coefficients have been obtained, one for each regular wave configuration; unlike other models in which they are unique to any sea state.

Finally, the series of irregular waves have been validated, in which a good adjustment has been achieved despite the uniqueness of the structure and the nonlinearities present in the laboratory tests.

In general, it is considered that the calibration and validation carried out during the preparation of this final master's thesis satisfactorily fulfill the intended objectives. It has been possible to obtain a calibrated numerical model capable of representing the movement of the device quite approximately, as well as the tensions in the anchoring system and tendons under any sea state. Although the model has certain limitations in some cases, problems have been detected and have been proposed as aspects of improvement to be studied in future research with the idea of solving them.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	6
1.1.	Estado del arte de la acuicultura offshore	6
1.2.	Motivación y necesidad de soluciones tecnológicas nuevas	7
1.3.	Alcance del documento: Estructura y objetivos.....	8
1.4.	Aclaraciones	9
2.	DESCRIPCIÓN DEL CONCEPTO DE JAULA DE ACUICULTURA	11
2.1.	Descripción general del modelo usado durante los ensayos.....	12
2.2.	Justificación técnica del diseño	13
3.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	18
3.1.	Descripción de la metodología aplicada	18
3.1.1.	Ensayos.....	18
3.1.2.	Numérico: Calibración/Validación.....	18
4.	ENSAYOS.....	21
4.1.	Descripción del laboratorio	21
4.1.1.	Equipamiento	21
4.2.	Leyes de escala	22
4.3.	Descripción de los ensayos realizados	22
4.3.1.	Descripción y disposición de la instrumentación dentro del tanque de ensayos	23
4.3.2.	Ensayos de caracterización en seco	23
4.3.3.	Ensayos de caracterización en tanque	25
4.3.4.	Ensayos con oleaje (regular e irregular).....	27
4.3.5.	Ensayos con corriente	29
4.4.	Resultados más relevantes.....	29
4.4.1.	Ensayos de caracterización en seco	29
4.4.2.	Ensayos de caracterización en tanque	31
4.4.3.	Ensayos en tanque	33
5.	NUMÉRICO	38
5.1.	Descripción del modelo numérico	38
5.1.1.	Teoría de flujo potencial	38
5.1.2.	Ecuación de Cummins	40
5.1.3.	Interpretación de la ecuación de Cummins	41

5.2.	Metodología	42
5.3.	Calibración/Validación del modelo	43
5.3.1.	Introducción	43
5.3.2.	Obtención del equilibrio inicial	44
5.3.3.	Calibración de ensayos de extinción (decay tests).....	46
5.3.4.	Calibración y validación de oleajes regulares.....	57
5.3.5.	Validación de oleajes irregulares	69
6.	CONCLUSIONES	73
6.1.	Resumen de trabajos realizados	74
6.2.	Resumen de resultados más relevantes	75
6.3.	Conclusión del trabajo.....	75
7.	REFERENCIAS	77
8.	AGRADECIMIENTOS.....	78

Índice de Figuras

Figura 1: Ejemplos de jaulas de acuicultura. De izquierda a derecha: AquaSpar (Fuente: http://espanol.cunadelmar.com/photo-gallery/#), Aquapod (Fuente: http://estreladalvacabofrio.blogspot.com.es/2010/12/so-pode-ser-esta-solucao-maricultura-1.html) y Sodac Offshore (Fuente: http://www.sodac.es/gallery/).....	7
Figura 2. Ejemplos de jaulas de acuicultura. De izquierda a derecha: Ocean Farming (Fuente: http://www.norwayexports.no/sectors/articles/petroleum-technology-for-ocean-farming/), Hauge Aqua (Fuente: http://aquaculturenorthamerica.com/topics/haug-aqua/) y North Sea Fishfarm (Fuente: http://www.globalmaritime.com/north-sea-fishfarm).....	8
Figura 3: Representación en 3D de la jaula diseñada en proyecto TEN-SHORES (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES)	8
Figura 4: Grados de libertad de la estructura flotante (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES).....	10
Figura 5: Elementos principales que conforman el diseño de la jaula (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES).....	11
Figura 6: Sistema de fondeo y orientación del oleaje (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES).....	12
Figura 7: Nomenclatura de las distintas partes que forman la estructura (Fuente: Ten-Shores_Diseño y Analisis de Jaula_Geometria y modelo numérico_v01)	15
Figura 8: Variación de parámetros y su influencia en GM, periodos naturales de heave y de pitch (Fuente: Ten-Shores_Diseño y Analisis de Jaula_Geometria y modelo numérico_v01) ...	16
Figura 9: CCOB del IHCantabria (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)	22
Figura 10: Sistema coordinado empleado con el sistema de captura de movimientos Qualysis para los oleajes con dirección de propagación de 0 grados (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)	23
Figura 11: Medición del CdG de la jaula (izquierda) y del sinker (derecha). (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)	24
Figura 12: Medición de momentos de inercia (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)...	25
Figura 13: Instante durante el ensayo de inclinación (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores).....	26
Figura 14: Disposición del modelo en el CCOB, posición fija durante toda la campaña de ensayos (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)	27
Figura 15: Serie temporal – Ensayos de extinción de jaula con sistema de fondeo y con sinker – Heave.....	32
Figura 16: Superposición de puntos obtenidos en ambos ensayos para cada configuración de offset estático. Aproximación exponencial a los puntos: Sway (izquierda) y a 45º (derecha) ...	33
Figura 17: Oleaje Regular: RAO movimientos	34
Figura 18: Oleaje Irregular – Condiciones de operación: RAO espectral de GdL.....	36
Figura 19: Oleaje Irregular – Condiciones de supervivencia: RAO espectral de GdL.....	37
Figura 20: Fuerzas de excitación y radiación en una estructura flotante (Faltinsen, 1993)	38
Figura 21: Series temporales de todos los GdL de jaula y sinker respectivamente. Configuración Multicuerpo Dinámico.....	45
Figura 22: Serie temporal del GdL Heave. Configuración Multicuerpo Dinámico	45
Figura 23: Decay test para el GdL Yaw. Coeficiente de masa añadida, A, sin calibrar.....	47

Figura 24: Decay test para el GdL Yaw. Coeficiente de masa añadida, A, calibrado	47
Figura 25: Decay test para el GdL Yaw. Calibrados A, kl y knl	48
Figura 26: Decay tests para los Gdl Surge, Heave, Pitch y Yaw. Configuración Multicuerpo Dinámico	50
Figura 27: Decay tests para los Gdl Surge, Heave, Pitch y Yaw. Configuración Rigidbody Dinámico	52
Figura 28: Decay tests para los Gdl Surge, Heave, Pitch y Yaw. Configuración Rigidbody Cuasiestático	54
Figura 29: Comparación decay test del Gdl Surge. Todas las configuraciones	55
Figura 30: Comparación decay test del Gdl Heave. Todas las configuraciones	56
Figura 31: Comparación decay test del Gdl Pitch. Todas las configuraciones	56
Figura 32: Comparación decay test del Gdl Yaw. Todas las configuraciones.....	57
Figura 33: Ejemplo de un caso de calibración de coeficientes de amortiguamiento en Excel ...	58
Figura 34: RAOs modelo número vs laboratorio. Configuración de oleaje C01. Sólido Rígido Cuasiestático	59
Figura 35: RAOs de sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C01	61
Figura 36: RAOs de sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C02	62
Figura 37: RAOs de sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C03	63
Figura 38: Serie temporal de oleaje de todos los GdL. Configuración C01, T 5.5. Sólido rígido cuasiestático.....	65
Figura 39: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C01, T 7. Sólido rígido cuasiestático.....	66
Figura 40: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C01, T 17. Sólido rígido cuasiestático.....	67
Figura 41: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C01, T 13. Sólido rígido cuasiestático.....	68
Figura 42: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C04, H 1.5, T 4.5. Sólido rígido cuasiestático.....	70
Figura 43: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C05, H 4.5, T 9.7. Sólido rígido cuasiestático.....	70
Figura 44: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C04, H 2.5, T 6. Sólido rígido cuasiestático.....	71
Figura 45: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C04, H 13.4, T 21. Sólido rígido cuasiestático.....	71
Figura 46: Tensiones en el sistema de fondeo (N). Oleaje irregular	72

Índice de Tablas

Tabla 1: Necesidades identificadas para el correcto funcionamiento de la estructura (Fuente: Borrador Memoria Justificativa 2016 IHCANTABRIA)	13
Tabla 2: Escalas para número de Froude constante (Fuente: Anexo II al Entregable E4 Proyecto Ten-Shores - Plan de Ensayos Ten-Shores)	22
Tabla 3: Características del oleaje generado: Oleaje Irregular	29
Tabla 4: Masas medidas de los elementos de la jaula	30
Tabla 5: Centros de gravedad teóricos y medidos para la configuración de lastre nominal	30
Tabla 6: Inercias teóricas y medidas para la configuración del lastre nominal.....	31
Tabla 7: Resultados altura metacéntrica: Media de cada ensayo (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores).....	31
Tabla 8: Resultados de periodos propios del ensayo.....	32
Tabla 9: Valores del coeficiente m	46
Tabla 10: Coeficientes de masa añadida y amortiguamiento para cada GdL de las tres configuraciones	55
Tabla 11: Coeficientes de amortiguamiento kl y knl para sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C01	64
Tabla 12: Coeficientes de amortiguamiento kl y knl para sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C02	64
Tabla 13: Coeficientes de amortiguamiento kl y knl para sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C03	65
Tabla 14: Tensiones en el sistema de fondeo (N). Oleaje regular.....	69

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fin de máster se enmarca en el proyecto “TEN-SHORES, Desarrollo de Tecnologías Nuevas en Acuicultura Oceánica”. Este proyecto busca diseñar un prototipo de jaula oceánica y validarlo a través de un modelo numérico, con el objetivo de que este modelo sea capaz de predecir el comportamiento en el mar de la jaula para cualquier estado de mar.

Se ha realizado una campaña de ensayos de laboratorio en el Gran Tanque de Ingeniería Marítima (en adelante CCOB, Cantabria Coastal and Ocean Basin), en la que he formado parte como estudiante en prácticas. Con la base de datos obtenida en esta campaña se ha realizado el modelado numérico y análisis dinámico de una estructura multi-cuerpo formada por una jaula y un lastre móvil (dispositivo Ten-Shores).

El modelo numérico ha sido calibrado mediante diferentes tipologías de ensayo y ha sido capaz de representar distintos oleajes irregulares con bastante exactitud. En este documento se describen todas las tareas realizadas para llegar a este resultado.

1.1. Estado del arte de la acuicultura offshore

La acuicultura es una actividad importante en muchas regiones europeas y supone más del 20% de la producción pesquera total de la UE. En el total de la producción acuícola mundial, la UE ocupa una cuota del 1,25% en términos de volumen y de 3,4% en términos de valor (Unión Europea, 2016). Sin embargo, los datos muestran una brecha creciente entre el consumo de productos marinos en la UE y el volumen de capturas de las pesquerías. Los pronósticos del Banco Mundial indican un importante aumento de la demanda mundial de pescado y marisco en los próximos 20 años, que, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), podría representar 40 millones de toneladas métricas adicionales de alimentos acuáticos (FAO, 2012). Por lo tanto, aunque las reservas silvestres se gestionen a niveles sostenibles, no podrán satisfacer la creciente demanda mundial de productos marinos.

A corto plazo, se espera que la mayor parte de la demanda sea abastecida por la acuicultura. En Europa, los estados miembros están trabajando para llenar la brecha entre el consumo y las capturas mediante la acuicultura sostenible desde el punto de vista medioambiental, social y económico. La acuicultura requiere aguas marinas limpias y saludables, que es una restricción pertinente debido a los impactos potencialmente nocivos de la acuicultura (por ejemplo, enriquecimiento de nutrientes y materias orgánicas, contaminación por sustancias peligrosas...). Sin embargo, hoy en día la principal restricción está relacionada con la falta de espacio, ya que la actual ocupación de la superficie y de la costa por las actividades acuícolas parece estar limitada. Esta falta, a menudo citada como un factor obstaculizador de la expansión de la acuicultura marina de la UE, podría superarse mediante la identificación de nuevos sitios susceptibles de ser explotados. Otros desafíos importantes identificados se relacionan con la accesibilidad a las jaulas offshore, la integridad de la estructura y el sistema de fondeo que limita el estado bajo las duras condiciones meteoceánicas en alta mar, lo que podría suponer la pérdida de la cosecha de peces e incluso de las jaulas de acuicultura que forman un parque.

La acuicultura offshore (cría de peces y mariscos) está surgiendo como la mejor oportunidad para la expansión del negocio, de tal manera que podría satisfacer la creciente demanda, reducir la incertidumbre del suministro, ofrecer a los consumidores un producto asequible, reducir el impacto ambiental y resolver el conflicto inherente de usos emergentes como consecuencia de la elevada y rápidamente creciente demanda de espacio marítimo. El potencial para este tipo de producción es evidente, también lo son los desafíos a los que se enfrenta. Las preguntas a resolver son numerosas e incluyen interrogantes tales como la viabilidad económica, la identificación de áreas adecuadas para la acuicultura, o las tecnologías para resistir las condiciones meteoceánicas mar adentro.

1.2. Motivación y necesidad de soluciones tecnológicas nuevas

El desarrollo y la mejora de jaulas offshore como sistemas de cultivo es uno de los factores más importantes para el crecimiento de la industria de la acuicultura offshore. Desde hace varios años, los diseñadores y las empresas están desarrollando diferentes conceptos de jaulas de acuicultura offshore, dando lugar a tecnologías singulares que buscan la mejor estructura acuícola desde el punto de vista del comportamiento en la mar de la estructura, del cultivo para el que se ha diseñado la estructura y económico (por su construcción, transporte, instalación, operación y mantenimiento). Hay diseños enfocados a estructuras sumergibles como *AquaSpar* de *InnovaSea* y *AquaPod* de *Ocean Farm Technologies*; otros a grandes plataformas de uso múltiple con aprovechamiento del viento de *Sodac Offshore*; otros diseños de plataformas de acuicultura offshore, tales como instalaciones de cultivo como las que presenta *Ocean Farming*; y por último, jaulas con diseños singulares como el de *Hauge Aqua*, una jaula de acuicultura en forma de huevo. Uno de los más novedosos y que ya se ha construido y pronto entrará en funcionamiento es *North Sea Fishfarm* de *Erko Seafood* y *Global Maritime*. Todos los nuevos diseños y otros no mencionados tratan de superar los diferentes desafíos del sector acuícola como son ampliar las áreas de producción y evitar la contaminación y la escorrentía en el entorno local, resistir las condiciones meteoceánicas mar adentro, actuar frente al impacto de los piojos en los salmones... entre otros.

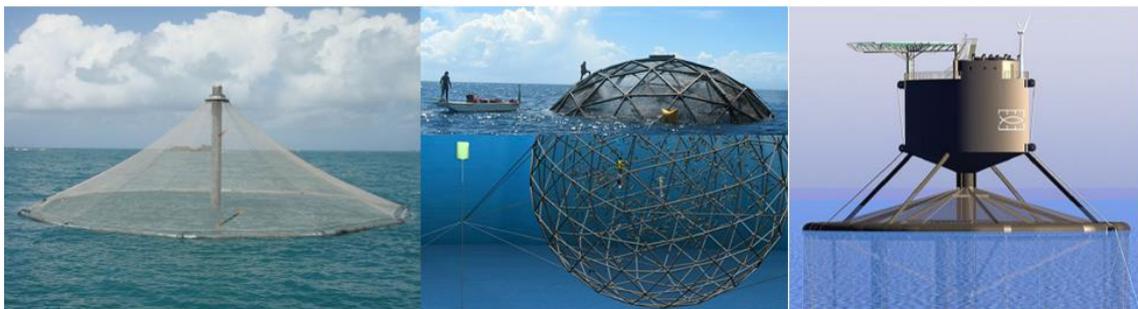


Figura 1: Ejemplos de jaulas de acuicultura. De izquierda a derecha: AquaSpar (Fuente: <http://espanol.cunadelmar.com/photo-gallery/#>), Aquapod (Fuente: <http://estreladalvacabofrio.blogspot.com.es/2010/12/so-pode-ser-esta-solucao-maricultura-1.html>) y Sodac Offshore (Fuente: <http://www.sodac.es/gallery/>)



Figura 2. Ejemplos de jaulas de acuicultura. De izquierda a derecha: Ocean Farming (Fuente: <http://www.norwayexports.no/sectors/articles/petroleum-technology-for-ocean-farming/>), Hauge Aqua (Fuente: <http://aquaculturenorthamerica.com/topics/haug-aqua/>) y North Sea Fishfarm (Fuente: <http://www.globalmaritime.com/north-sea-fishfarm>)

El presente trabajo fin de máster presenta el análisis hidrodinámico de un nuevo concepto, diseñado y desarrollado especialmente por IHCantabria, de una jaula de acuicultura offshore capaz de soportar las condiciones meteoceánicas en alta mar sin perjudicar al cultivo y facilitando su operación y mantenimiento (España Patente nº ES-2578429_A1, 2016). El diseño y estudio forman parte del proyecto TEN-SHORES (RTC-2014- 2485-5), en el que participan IHCANTABRIA, TACSA, ACCISA y TINAMENOR.

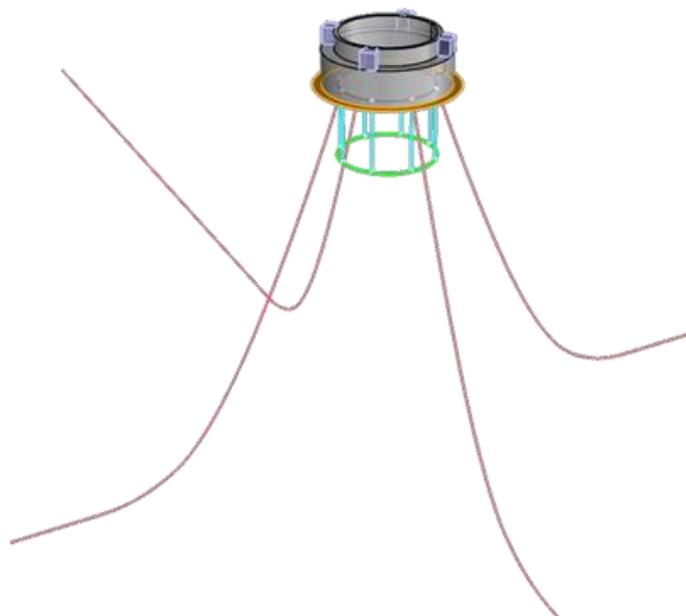


Figura 3: Representación en 3D de la jaula diseñada en proyecto TEN-SHORES (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES)

1.3. Alcance del documento: Estructura y objetivos

El principal objetivo del prototipo de la jaula es el cultivo en mar abierto de especies de peces de un alto valor económico, como alternativa a la acuicultura en la costa y a la pesca tradicional. Con el proyecto TEN-SHORES se aspira a implantar un nuevo modelo de acuicultura en mares abiertos con condiciones extremas, pero con un menor impacto ambiental y mejores

condiciones para el crecimiento de las especies, lo cual repercutiría en la mejora de la calidad del pescado y evitaría la necesidad de esquilmar los caladeros existentes.

La jaula se basa en una estructura flotante de hormigón con un buen comportamiento hidrodinámico para amortiguar los movimientos producidos por el oleaje, viento y corriente, gracias a su geometría, distribución de masa y el uso de una placa de arfada, para mejorar su comportamiento en arfada.

El objetivo principal del presente trabajo fin de máster es la calibración y validación de herramientas numéricas y la comprobación de la viabilidad técnica del diseño alcanzado en el proyecto TEN-SHORES. Para ello se ha contado con una base de datos obtenida a partir de la caracterización experimental del diseño en ensayos llevados a cabo en el Gran Tanque de Ingeniería Marítima (CCOB) del IHCantabria de la respuesta hidrodinámica del dispositivo frente a diferentes condiciones de oleaje y corriente.

En este contexto, la presente contribución se enfrenta al diseño de un sistema de explotación de jaulas offshore capaces de soportar las condiciones meteoceánicas. El trabajo presenta: (i) el diseño de la jaula de acuicultura realizado en las primeras fases del proyecto TEN-SHORES, (ii) las pruebas experimentales realizadas en IHCantabria, (iii) la descripción del modelo numérico en el dominio del tiempo desarrollado, y (iv) casos de calibración y validación del modelo desarrollado.

1.4. Aclaraciones

Siguiendo la literatura y los usos estándar, se mencionarán los grados de libertad (en adelante GdL) de movimiento de la jaula flotante indistintamente tanto en castellano como en inglés. Para facilitar la comprensión, se definen y traducen a continuación los grados de libertad:

- Largada/Surge: desplazamiento longitudinal al oleaje.
- Deriva/Sway: desplazamiento transversal al oleaje.
- Arfada/Heave: desplazamiento vertical respecto al plano de superficie libre.
- Balance/Roll: giro respecto al eje longitudinal al oleaje.
- Cabeceo/Pitch: giro respecto al eje transversal al oleaje.
- Guiñada/Yaw: giro respecto al eje vertical de arfada.

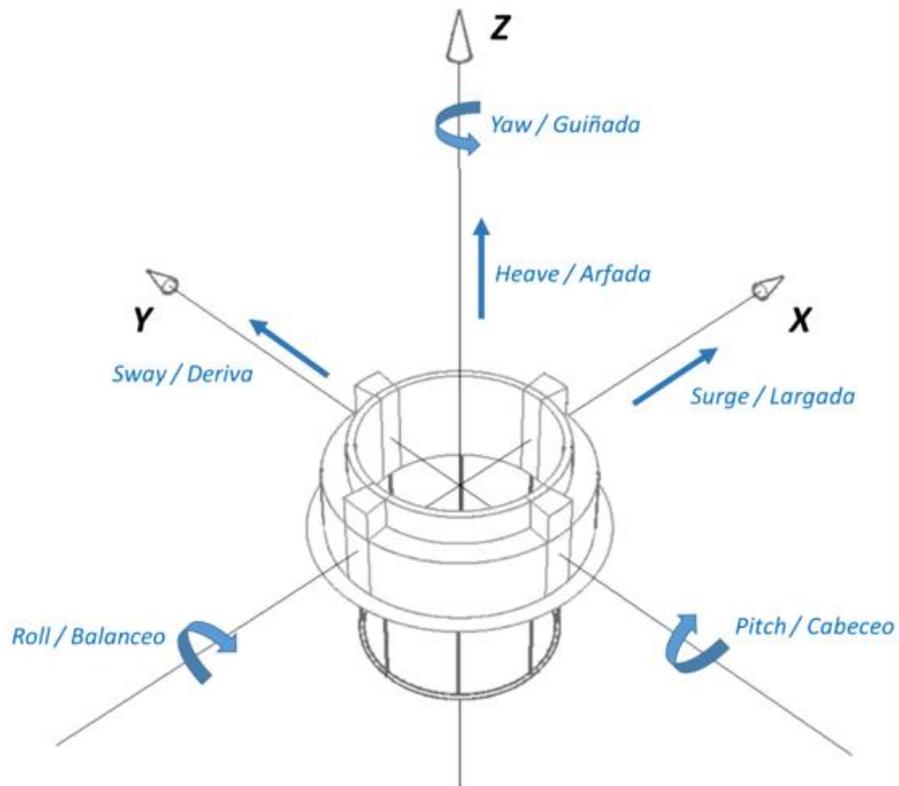


Figura 4: Grados de libertad de la estructura flotante (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES)

2. DESCRIPCIÓN DEL CONCEPTO DE JAULA DE ACUICULTURA

El dispositivo TEN-SHORES es una jaula de acuicultura offshore que está formada por dos cilindros de hormigón huecos, rellenos de poliestireno expandido (para garantizar la estanqueidad de la estructura), que tienen igual radio interior y distinto radio exterior, superpuestos, estando el de menor radio encima (para reducir el área de flotación, para influir en la reducción de periodo propio de arfada). En la base del cilindro inferior se encuentra una placa de arfada (faldón o heave plate de acero, que sirve para amortiguar los movimientos de la estructura en ciertos grados de libertad). También cuenta con cuatro silos (para el almacenamiento del alimento de los peces) unidos al cilindro superior. Todo ello constituye la estructura principal de la jaula que va unida, por su parte inferior, a un lastre toroidal (en adelante sinker) a través de unos tendones que cuelgan de la misma. El sinker sirve para pretensionar los tendones y soportar la red de contención de especies.

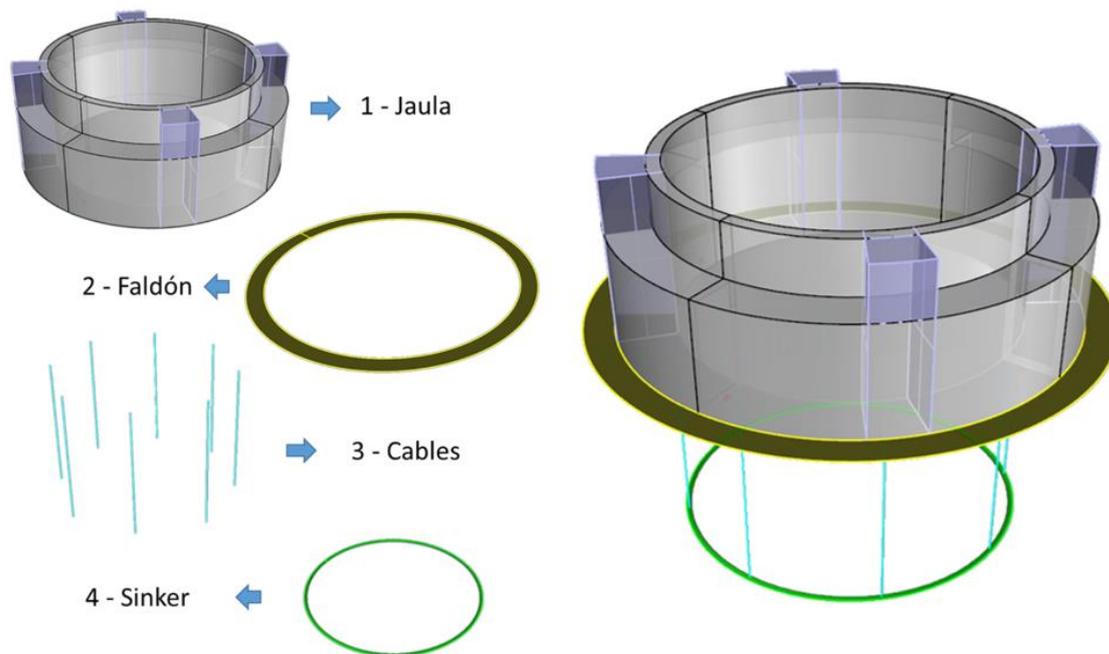


Figura 5: Elementos principales que conforman el diseño de la jaula (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES)

El sistema de fondeo será del tipo spread-mooring. Está formado por cuatro líneas de fondeo separadas 90º entre ellas. Estas líneas de anclan al terreno del fondo en su extremo inferior y se unen a la estructura por el otro extremo a través de los fairleads (guías que actúan como puntos de unión entre la línea de fondeo y la jaula). Puesto que las líneas inicialmente no están en tensión, tomarán la forma de catenaria.

El sistema de fondeo está orientado de tal forma que las olas llegan en la bisectriz formada por dos líneas de fondeo tal y como se muestra en la Figura 6.

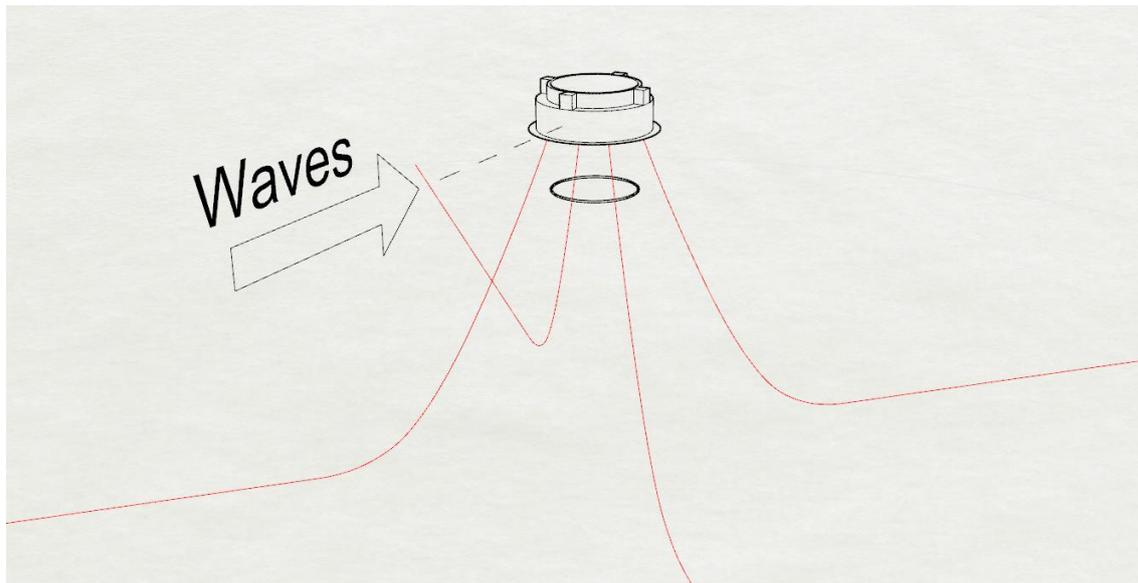


Figura 6: Sistema de fondeo y orientación del oleaje (Fuente: Entregable E4 Proyecto TEN-SHORES)

Posteriormente en el apartado “4.3.1 Descripción y disposición de la instrumentación dentro del tanque de ensayos”, se describe la operativa experimental en detalle, así como la integración de la sensórica en el dispositivo y su disposición relativa en el tanque.

2.1. Descripción general del modelo usado durante los ensayos

El modelo construido a escala 1:30 (según las leyes de escalado de Froude, que se explican más adelante en el 4.2 Leyes de escala) se fabricó en acero, material que ha permitido alcanzar las masas, momentos de inercia y centros de gravedad de cada uno de los dos cuerpos. Ambos cuerpos (estructura principal y lastre toroidal) se unieron mediante cables con muelles para simular la rigidez a escala prototipo y con células de carga en 5 de los tendones para poder medir las fuerzas durante los ensayos. A su vez, se modeló el sistema de fondeo con cuatro cadenas a escala, junto a sus correspondientes muelles y células de carga. A continuación, se describen las partes principales del modelo:

La **jaula** es la estructura principal. Se encarga de dar la flotabilidad y de soportar las condiciones meteoceánicas del entorno. En ella se encuentran también los silos para el almacenamiento del alimento de los peces en los que, durante el ensayo, se situaron lastres para ajustar el centro de gravedad y los momentos de inercia. Unida a la jaula en el plano inferior se encuentra la placa de heave, que sirve para amortiguar los movimientos en los grados de libertad heave, roll y pitch.

Se ha construido en acero para mantener las relaciones con el prototipo, ya que se pueden conseguir espesores mucho menores y, por tanto, ajustarse mejor a los parámetros geométricos reales que con otro material. Los espacios vacíos se rellenaron con espuma de poliuretano para asegurar la estanqueidad.

El **sistema de fondeo** se encarga de que la jaula no se desplace indefinidamente. Está formado por cuatro cadenas de acero unidas al modelo a través de células de carga para registrar las tensiones generadas en cada una de ellas. Para conseguir la masa lineal requerida se tuvieron

que añadir lastres de plomo cada tercio de metro. En el extremo del fondo de cada una de las líneas se colocó un muelle para conseguir que las cargas extremales sean lo más reales posible.

Los **tendones** unen el sinker a la jaula. Están formados por varios elementos; entre ellos podemos destacar un muelle para que la rigidez de los mismos fuese lo más parecida a la rigidez del sistema a escala prototipo, una célula de carga para medir las tensiones generadas en los tendones (como sólo había 5 células de carga y son 8 los tendones, en los tres tendones sobrantes la célula de carga se sustituyó por una pletina con un peso y dimensiones equivalente al de la célula de carga) y un tensor que permitía modificar la longitud del tendón para ajustar las tensiones estáticas una vez que estuviese montado el dispositivo.

El **sinker** sujeta la red de contención de peces. Se construyó en acero al igual que la jaula, cuenta también con unos lastres para alcanzar la masa adecuada a escala laboratorio.

2.2. Justificación técnica del diseño

El objetivo fundamental de la estructura es ser capaz de soportar cargas extremas para la cría y cultivo de especies en alta mar en aguas expuestas ($H_s < 5m$). Las necesidades a las que se enfrentan este tipo de estructuras en alta mar para ser competitivas y seguras, y los parámetros de diseño más importantes que repercuten en dichas necesidades se resumen en Tabla 1:

Necesidades	Características
Comportamiento en la mar (evitar resonancia)	Baja superficie de flotación
Estabilidad	Bajo centro de gravedad
Flotabilidad	Gran desplazamiento (toneladas)
Competitividad	Gran volumen interior (contención de especies)
Evitar parásitos marinos (piojos de salmón)	Calado de más de 8m
Aumentar amortiguamiento en arfada	Inclusión de Heave Plate
Rápida y barata construcción	Empleo de hormigón

Tabla 1: Necesidades identificadas para el correcto funcionamiento de la estructura (Fuente: Borrador Memoria Justificativa 2016 IHCANTABRIA)

A continuación, se explican brevemente estos efectos:

1. Se requiere una baja superficie de flotación ya que, como se demuestra después, cuanto menor sea el área de flotación, menor es la rigidez hidrostática, lo que hace que aumente el periodo propio de la estructura, alejándose de los periodos de los oleajes. De esta manera se minimiza la posibilidad de que la estructura entre en resonancia.
2. Al igual que lo anterior esto queda demostrado más adelante. Se necesita que el centro de gravedad esté lo más bajo posible para que la altura metacéntrica se lo más alta posible. La altura metacéntrica es lo que caracteriza la estabilidad de cualquier

estructura flotante, ya que si es menor que cero quiere decir que el empuje del agua está actuando por debajo del peso de la estructura (el centro de empuje está por debajo del metacentro) lo que originaría un momento volcador que desestabilizaría la estructura. Debido a esto la altura metacéntrica en cualquier cuerpo flotante debe ser siempre mayor que 0.

3. Conseguir un gran desplazamiento se traduce en aumentar el empuje hidrostático, garantizando así la flotabilidad de la estructura. Además, ayudaría a aumentar la altura metacéntrica. Sin embargo, esto tiene como contrapartida que, si aumentamos el volumen sumergido, aumenta la rigidez hidrostática y, por tanto, disminuirían los periodos propios de la estructura. Es por estas razones por las que se requiere un modelo paramétrico para llegar a una solución óptima.
4. Como es obvio se requiere que el coste de la estructura vaya en consonancia con el beneficio que aportará a posteriori. No sería lógico construir una estructura de esta envergadura si va a tener la misma capacidad que los sistemas existentes cerca de la costa. Por ello se va a requerir que la capacidad de contención de peces sea máxima.
5. Se considera en IHCantabria que para calados de más de 8 metros se consigue evitar el impacto de parásitos marinos, como es el caso de los piojos en el salmón.
6. La inclusión de un heave plate ayudará a que en los movimientos se heave, roll y pitch, el volumen de agua desplazada sea mayor, amortiguando dichos movimientos.
7. Para la construcción de la jaula se empleará hormigón dado su bajo coste y sus buenas características de trabajabilidad y puesta en obra.

Una vez se tuvo un diseño definido, los investigadores del IHCantabria llevaron a cabo un análisis mediante un modelo paramétrico para analizar cómo influía la modificación de los parámetros básicos (9 en este caso) tanto en la estabilidad como en los periodos propios de la estructura, ya que, como se comentó anteriormente, están influenciados unos con otros y hay que llegar a una solución óptima. Los criterios principales que tuvieron en cuenta fueron que los periodos propios fueran lo más altos posible, para evitar que la estructura entre en resonancia bajo condiciones de oleaje y que la altura metacéntrica fuera mayor que la unidad para garantizar la estabilidad de la jaula en alta mar, según las recomendaciones de la normativa DNV-GL: Rules and Standards.

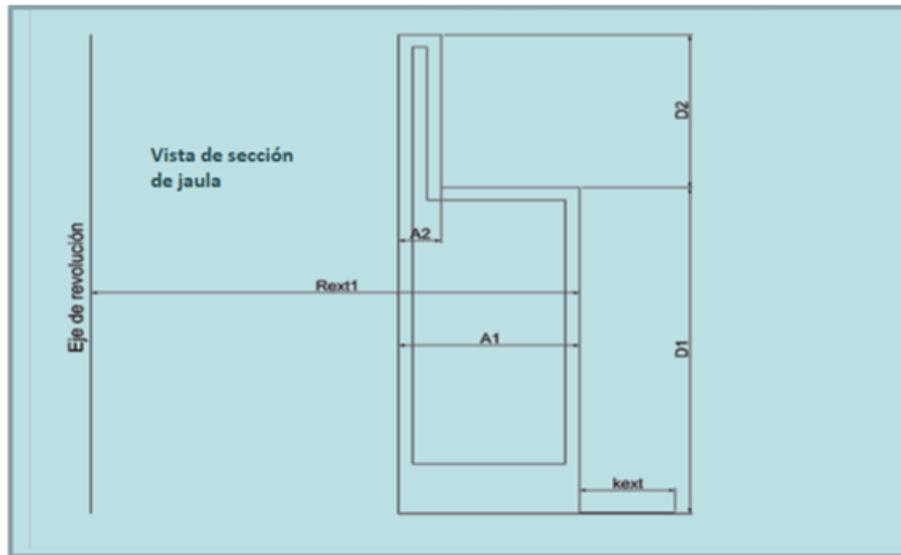


Figura 7: Nomenclatura de las distintas partes que forman la estructura (Fuente: Ten-Shores_Diseño y Analisis de Jaula_Geometria y modelo numérico_v01)

Sin embargo, la altura metacéntrica y los periodos propios no son independientes y al aumentar la altura metacéntrica, se aumentaba la rigidez de la estructura y al aumentar esta rigidez el periodo propio disminuía. Por ello, los investigadores del IHCantabria han tratado de maximizar el periodo propio de la estructura sin perder de vista la rigidez.

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{M + A_\infty}{k}}$$

$$k_{desplazamiento\ vertical\ (arfada)} = \rho \cdot g \cdot A$$

$$k_{giro\ (balance/cabeceo)} = \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM$$

Siendo M la matriz de masas, A_∞ la masa añadida, k la rigidez, ρ la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad, A el área de flotación, ∇ el volumen de carena o volumen sumergido y GM la altura metacéntrica (de 3 grados de libertad, arfada, balanceo y cabeceo).

$$GM = BM + KB - KG$$

$$BM = \frac{I_{xx}}{\nabla}$$

Siendo GM la altura metacéntrica, BM el radio metacéntrico, KB altura del centro de carena, KG altura del centro de gravedad, I_{xx} el momento de inercia de la superficie de flotación y ∇ el volumen de carena o volumen sumergido.

Se fueron variando todos los parámetros hasta llegar a un diseño óptimo. En la Figura 8 queda representado el análisis parametrizado llevado a cabo por los investigadores del IHCantabria. Estas gráficas se muestran como apoyo visual de las ecuaciones anteriormente comentadas, pero no son parte del presente trabajo.

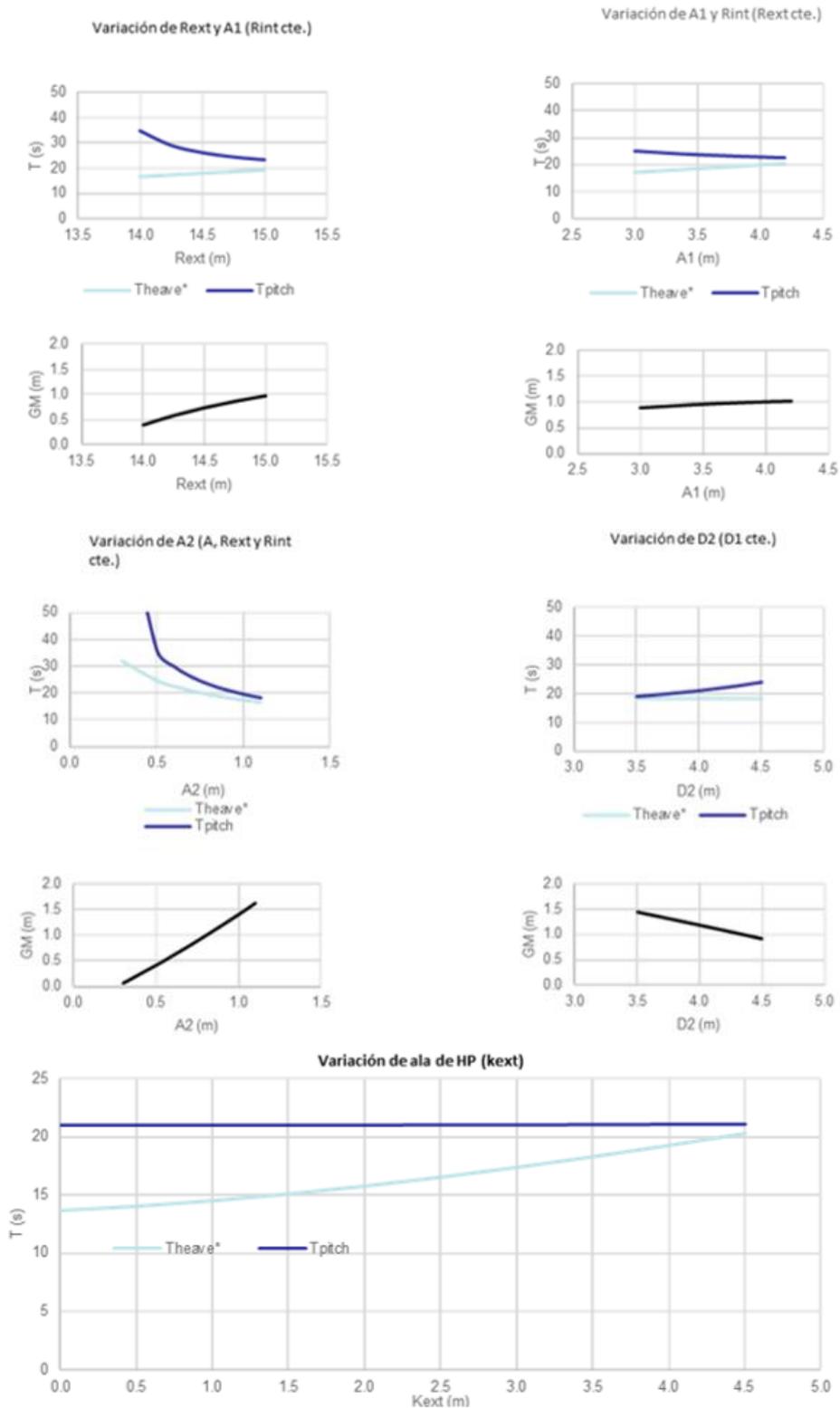


Figura 8: Variación de parámetros y su influencia en GM, periodos naturales de heave y de pitch (Fuente: Ten-Shores_Diseño y Analisis de Jaula_Geometría y modelo numérico_v01)

El material empleado para el dispositivo flotante es hormigón, dadas sus ventajas de coste y de facilidad de fabricación. El interior de los cilindros huecos se rellena con material de baja

densidad (EPS, poliestireno expandido) de manera que no aumente el peso de la estructura y proporcione la estanqueidad necesaria en el caso de que se produzcan fisuras en el hormigón. Sin embargo, debido al pequeño espesor de la placa de heave, está se construirá en acero, ya que este material permite ajustarse mejor a la geometría requerida.

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.1. Descripción de la metodología aplicada

3.1.1. Ensayos

Se ha realizado una campaña de ensayos de laboratorio a escala (1:30) para la confirmación de la viabilidad técnica del diseño de jaula desarrollado. Asimismo, se ha generado una base de datos experimental que ha servido para la calibración de las herramientas numéricas.

Para alcanzar dicho objetivo principal, se plantean una serie de objetivos secundarios que se incluyen como parte de la campaña de ensayos, y que su consecución supone cumplir el objetivo principal:

- Evaluación del comportamiento dinámico del flotador.
- Evaluación del comportamiento dinámico del lastre.
- Evaluación del comportamiento acoplado flotador-lastre.
- Estudio del comportamiento dinámico de los tendones que unen flotador y lastre.
- Estudio del comportamiento dinámico de las líneas de fondeo.
- Análisis de comportamiento frente a condiciones de oleaje y corriente tanto de operación como de supervivencia.

A continuación, se resumen los ensayos llevados a cabo tanto dentro como fuera del tanque:

1. Ensayos de caracterización en seco (fuera del tanque). Medición de peso, ensayos de medición de momentos de inercia y ensayos de tracción de los tendones y las catenarias.
2. Ensayos sin oleaje o de caracterización del dispositivo (dentro el tanque): Prueba de estanqueidad, ensayos de extinción con y sin sistema de fondeo, ensayos de inclinación (también llamados de estabilidad) y ensayos de offset estático.
3. Ensayos con oleaje y corrientes: En total se han realizado 44 ensayos: 27 ensayos de oleaje regular, 13 de oleaje irregular (operación y supervivencia) y 4 de corriente.

3.1.2. Numérico: Calibración/Validación

Para la optimización de la geometría de la jaula oceánica, IHCantabria ha desarrollado un modelo numérico acoplado capaz de analizar movimientos de la estructura bajo el efecto de diferentes condiciones meteoceánicas (oleaje, viento y corriente), las fuerzas sobre las líneas de fondeo y las fuerzas sobre los tendones que dan rigidez a la red de contención de especies de peces.

Dicho modelo numérico se ha calibrado y validado con los resultados de los ensayos de laboratorio.

La metodología de calibración y validación se puede resumir de la siguiente forma:

1. Obtención de equilibrio inicial: para obtener la posición estática de la jaula y las tensiones iniciales en tensores y líneas de fondeo.
2. Calibración de ensayos de extinción (decay tests): realización de iteraciones de ajuste de serie temporal (tanto en amplitud como en periodo) y de cargas en líneas de fondeo, para ajustar los coeficientes de amortiguamiento y de masa añadida para cada grado de libertad.
3. Calibración y validación de oleajes regulares:
 - El objetivo es reproducir los movimientos de los 12 grados de libertad y las tensiones del sistema de fondeo.
 - Ajuste de series temporales de grados de libertad para cada oleaje regular prestando especial atención a las amplitudes y desfases. A su vez, se comprobarán las amplitudes de las tensiones en el sistema de fondeo y los desfases de las mismas.
 - Comprobación general de cada grado de libertad: obtención de RAOs (operadores de respuesta en amplitud) de numérico y comparación con RAOs de ensayo.
 - Iteraciones modificando en algún caso los parámetros de coeficiente de amortiguación y de masa añadida para dejar el modelo ajustado.
 - Hay que tener en cuenta las no linealidades que se hayan detectado en los ensayos, debido a la geometría de la jaula, sobre todo, a la placa de heave, y otros fenómenos como el moon-pool.
4. Validación de oleajes irregulares:
 - Se usan los parámetros obtenidos en la calibración realizada en la anterior etapa, correspondiente a los oleajes regulares.
 - Comprobación de que no se producen desfases importantes y amplitudes muy diferentes a las obtenidas en el ensayo tanto en movimientos como fuerzas en sistema de fondeo.

Siguiendo esta metodología, es posible realizar la calibración y validación del modelo numérico acoplado desarrollado en el proyecto, el cual combina tres modelos numéricos de forma simultánea, como son:

- Modelo numérico hidrodinámico basado en la ecuación de Cummins que se alimenta de código potencial BEM (Boundary Element Method) y de otras fuerzas exteriores que permiten incluir no linealidades, dando lugar a un modelo dinámico.
- Modelo numérico de sistema de fondeo: tanto cuasi-estático como dinámico. Está basado en la resolución de la catenaria, teniendo uno de los extremos móvil (el que se conecta a la jaula) y el otro fijo, el cual corresponde al ancla.

- Modelo numérico de sistema de tensores/tendones: este modelo solo puede ser dinámico. Está basado en el modelo de sistema de fondeo dinámico, con la singularidad de que ambos extremos son móviles, ya que uno está conectado a la jaula y el otro al lastre toroidal.

Todo ello se integra en un único modelo numérico acoplado y se resuelve simultáneamente para obtener tanto la posición de la jaula como las fuerzas tanto en sistema de fondeo como en sistema de tendones.

4. ENSAYOS

4.1. Descripción del laboratorio

Los ensayos de este prototipo de jaula de acuicultura se han realizado en el Gran Tanque de Ingeniería Marítima (CCOB). El CCOB forma parte de las instalaciones del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (en adelante, IHCantabria), siendo una de las ICTS (Instalación Científico Técnica Singular) más importantes de España.

El CCOB cuenta con 44 metros de ancho, 30 metros de longitud y una profundidad variable, de 0,2 a 3,2 metros, que se ajusta a las necesidades de cada campaña de ensayos.

4.1.1. Equipamiento

El CCOB está equipado con un generador de oleaje formado por 64 palas independientes. Este sistema tiene incorporado un sistema completo de absorción activa 3D del oleaje. La máxima altura de ola que se puede generar es de 1.1 metros a escala modelo para una profundidad de 3 metros.

El CCOB dispone también de un sistema de generación de corrientes que puede generar una velocidad máxima nominal de 0.3 m/s en una profundidad de 3 metros, o 0.6 m/s para una profundidad de 1 metro (de nuevo, estos datos son a escala modelo).

Junto a estos sistemas de generación de condiciones meteoceánicas, el CCOB también está equipado con un generador de viento portátil de alta calidad, con capacidad de generar vientos de 20 m/s a escala modelo a un 1 metro de la salida del aire. Además, como uno de los últimos desarrollos tecnológicos del IHCantabria en energía eólica, se dispone de un dron a instalar en plataformas de generación de energía eólica, que genera el empuje y momentos en el tanque correspondientes a los producidos por las turbinas eólicas para los vientos de los diferentes estados de mar.

Respecto a su capacidad de movimiento de cargas, el laboratorio dispone de un puente grúa de 10 toneladas y 3 carretillas elevadoras de 3 toneladas.

Por último, el CCOB también dispone de un taller de carpintería, un laboratorio de tamizado y todo tipo de instrumentación, para poder llevar a cabo todos los ensayos y pruebas que los diferentes proyectos de investigación y de consultoría requieran.

A continuación, se muestra una foto del CCOB y una tabla con las características del mismo.

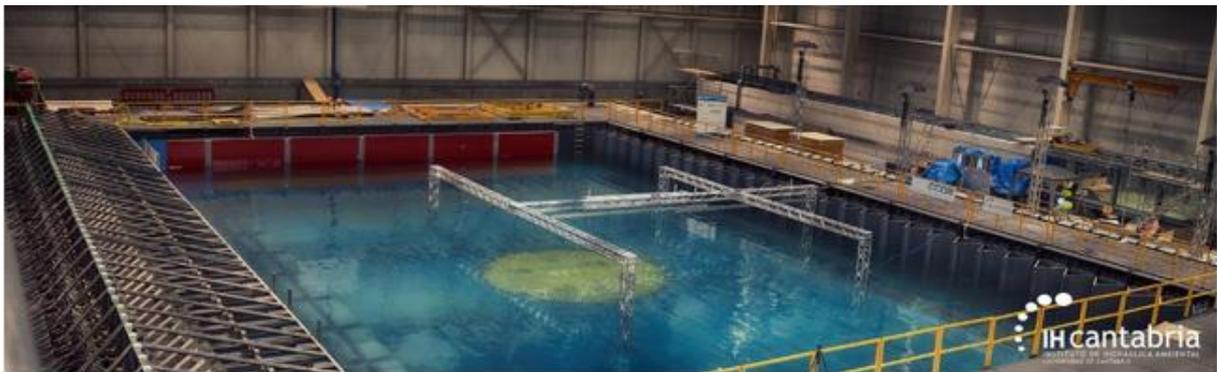


Figura 9: CCOB del IHCantabria (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)

4.2. Leyes de escala

La escala de los ensayos se ha elegido de tal manera que las dimensiones principales del modelo y su profundidad de operación queden limitadas por las dimensiones del tanque, para poder aprovechar al máximo los recursos disponibles.

Teniendo en cuenta el párrafo anterior, se optó por llevar a cabo la campaña de laboratorio a una escala de 1:30 siguiendo las leyes de escala de Froude. Estas leyes de escala mantienen el número de Froude ($F_n = V / (L * g)^{0.5}$) constante entre el modelo y el prototipo a escala real. La diferencia de densidades entre el laboratorio y el mar se ha tenido también en cuenta, siendo necesario aplicar el factor de densidad en todas las dimensiones que tienen relación con la masa.

A continuación, se muestra una tabla con algunos de los factores de conversión de diferentes magnitudes:

Algunos factores de escala según las leyes de Froude	
Densidad del agua en el modelo	1000 kg/m ³
Densidad del agua en el prototipo	1025 kg/m ³
Escala de longitudes	λ
Escala de tiempos y velocidades	$\lambda^{0.5}$
Escala de aceleraciones	1
Escala de fuerzas	λ^3
Escala de coeficiente de amortiguamiento	$\lambda^{2.5}$
Escala de masas	λ^3

Tabla 2: Escalas para número de Froude constante (Fuente: Anexo II al Entregable E4 Proyecto Ten-Shores - Plan de Ensayos Ten-Shores)

4.3. Descripción de los ensayos realizados

En este apartado se describe brevemente los ensayos llevados a cabo durante la campaña de laboratorio para obtener una base de datos que servirá para calibrar el modelo numérico.

4.3.1. Descripción y disposición de la instrumentación dentro del tanque de ensayos

Para la correcta caracterización del comportamiento del dispositivo se instalaron una serie de sensores. A continuación, se resumen los más relevantes:

- Sensores de superficie libre que registrarán el oleaje en el exterior del modelo para poder separar la ola incidente de la reflejada y obtener el oleaje real que llega a la estructura y la reflexión que se produce en el tanque de ensayos.
- Sistema óptico Qualisys para el registro de los movimientos del dispositivo en los seis grados de libertad del mismo en tiempo real. En la Figura 10 se muestra el sistema de coordenadas empleado usando Qualisys.

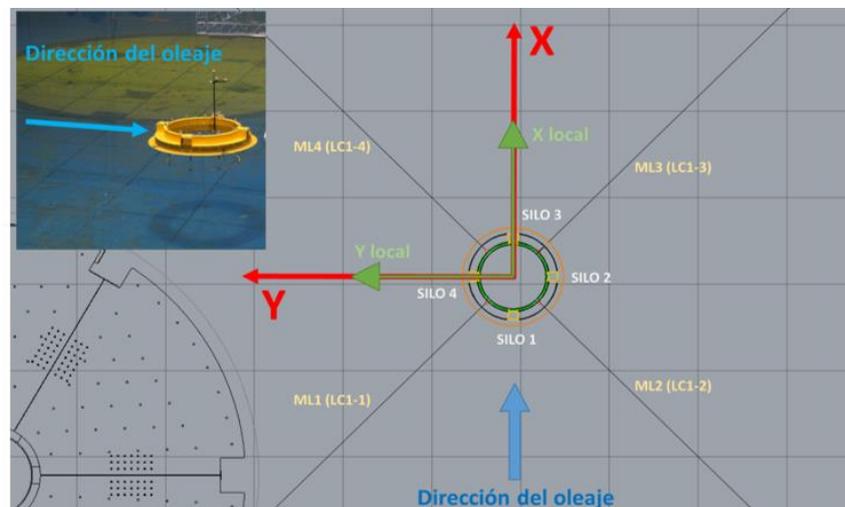


Figura 10: Sistema coordinado empleado con el sistema de captura de movimientos Qualisys para los oleajes con dirección de propagación de 0 grados (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)

- Células de carga en cada una de las líneas de fondeo mediante las cuales se identificarán las tensiones producidas como consecuencia de la acción del oleaje. También se colocan en cinco de los tendones para registrar las tensiones que se producen en los mismos.
- Sistema de vídeo para registrar gráficamente los ensayos realizados. Una de las cámaras es una cámara marina que permite registrar los movimientos del sinker.

4.3.2. Ensayos de caracterización en seco

Tras los necesarios ensayos de estanqueidad del modelo, se realizaron ensayos de caracterización en seco para comprobar que el modelo se ajustaba a los requerimientos especificados de distribución de masas para poder representar, de manera correcta, el comportamiento de la jaula en el mar. En estos ensayos se obtuvo la masa total de la condición de carga, el centro de gravedad y los momentos de inercia del modelo.

4.3.2.1. Ensayos de estanqueidad, distribución de masas y de obtención del CDG

Para realizar el ensayo de **estanqueidad** se pesa el modelo en seco previamente y, después, se deja flotando en el tanque durante un tiempo determinado. Una vez transcurrido ese tiempo, se extrae del agua, se seca y se vuelve a pesar comparando ambas medidas realizadas. Si la variación es nula o despreciable, se puede concluir que el modelo es estanco. En este caso, se dejó durante toda una noche y la variación de peso fue despreciable.

Para obtener el **centro de gravedad**, se midieron los pesos en tres pares de puntos con dos células de carga. Aplicando la regla de la palanca para cada par de puntos, se obtienen tres planos, cuya intersección da lugar a un punto que es el centro de gravedad (en adelante, CdG).

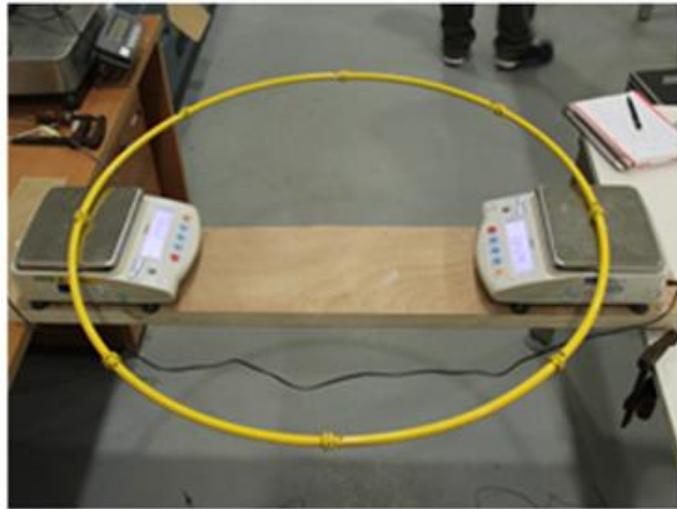
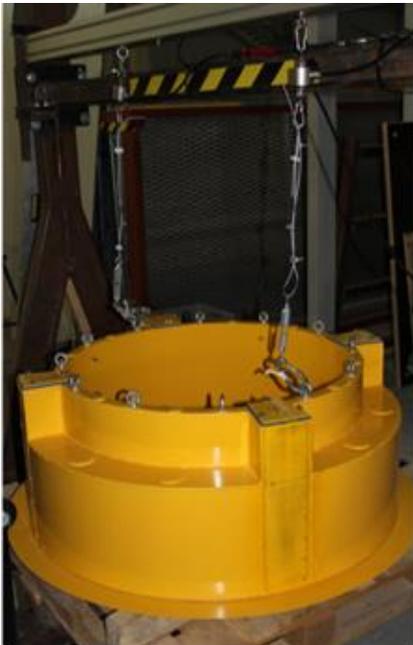


Figura 11: Medición del CdG de la jaula (izquierda) y del sinker (derecha). (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)

Los ensayos de **obtención de momentos de inercia** se realizaron mediante una celosía con forma de columpio en el que se medían el periodo y el radio de giro en los distintos GdL. Después, a través de la ecuación del péndulo compuesto y el teorema de los ejes paralelos, se calculan los momentos de inercia respecto a los ejes coordenados.

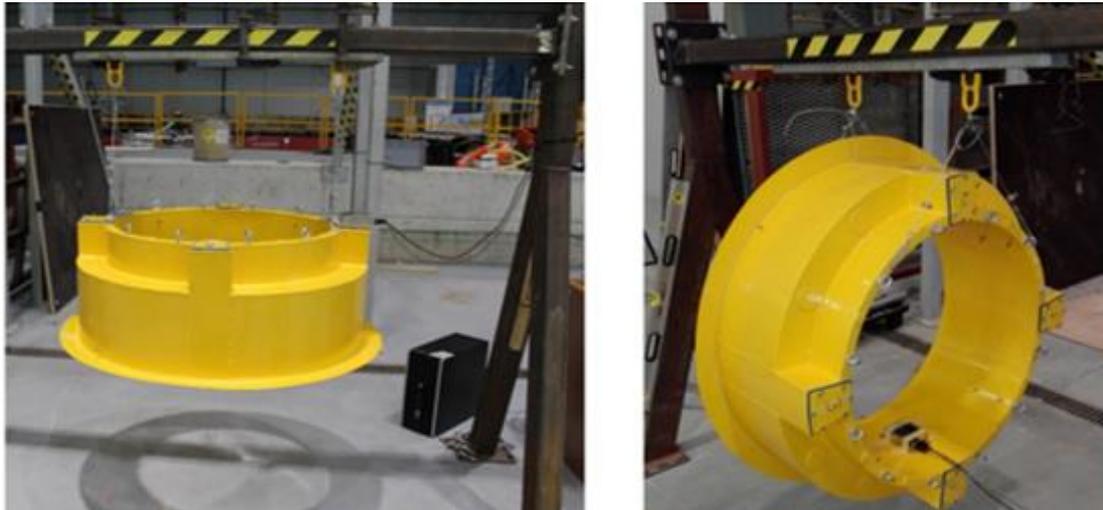


Figura 12: Medición de momentos de inercia (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)

Una vez realizados estos ensayos, se compararon los resultados con los parámetros objetivo y se realizaron varios ajustes de masas de lastre para conseguir adaptarse, en la medida de lo posible, a la masa, momentos de inercia y centro de gravedad previstos, ya que todo ello influye en la hidrostática (calado) y en la hidrodinámica de la estructura flotante.

4.3.2.2. Rigidez axial de la cadena y del cable

Para poder conocer las características mecánicas de las cadenas del sistema de fondeo y de los tendones, se llevaron a cabo ensayos de tracción en LADICIM (grupo de I+D+i adscrito al Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales de la Universidad de Cantabria), ya que disponen de la maquinaria certificada para realizar estos ensayos.

La **rigidez** obtenida se extrapola a escala prototipo para comprobar que el modelo se asemejaba a la realidad. Como la rigidez axial no era equivalente, se añadió un muelle en cada línea de fondeo y tendón, para que la suma de rigideces fuese lo más cercana a la rigidez objetivo de cada elemento. En el caso de las líneas de fondeo, el muelle se colocó junto al anclaje del fondo para que en el caso de que se produjeran cargas extremas dichas cargas se produjeran teniendo en cuenta la rigidez real de la cadena. En el resto de casos de operación, el fondeo se comporta como una catenaria, donde el parámetro más importante es el peso por metro y su longitud. En el caso de los tendones, como el sistema está en tensión, el comportamiento está gobernado por la rigidez del muelle.

4.3.3. Ensayos de caracterización en tanque

Se realizaron una serie de ensayos de caracterización en tanque para poder obtener una serie de parámetros hidrodinámicos y físicos necesarios para comprender y representar correctamente el comportamiento del dispositivo con el modelo numérico. Estos se llevaron a cabo en ausencia de oleaje y corrientes.

4.3.3.1. Ensayos de Inclinación (Tilt test)

Los ensayos de inclinación se realizan para determinar la **altura metacéntrica (GM)**, parámetro que determina la estabilidad inicial de la estructura. En este caso, se realizó para la condición de 100% de pienso en silos, condición principal de operación de la jaula. La altura metacéntrica corresponde a la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro, la cual representa un indicador del grado de estabilidad inicial de la estructura flotante, siendo condición necesaria que dicho parámetro sea positivo.

Este ensayo consiste en el movimiento de pesos de una banda a otra de la estructura para provocar una escora paulatina correspondiente. En el caso de Ten-Shores, debido a la doble simetría de la estructura, solo es necesario hacerlo en una de las direcciones, habiéndose escogido en este caso el giro en pitch.



Figura 13: Instante durante el ensayo de inclinación (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)

4.3.3.2. Ensayos de extinción (Decay test)

El objetivo de los ensayos de extinción es la determinación de los **periodos naturales de oscilación** y los **coeficientes de amortiguamiento** en los grados de libertad (GdL) de interés de la estructura flotante.

Estos ensayos consisten en alterar la posición de equilibrio de la estructura mediante una fuerza exterior para cada uno de los grados de libertad. Una vez alterada, se libera dejando que oscile libremente hasta volver a alcanzar la posición inicial de equilibrio.

4.3.3.3. Ensayos de offset estático

El objeto de este ensayo es determinar la **rigidez del sistema de fondeo** en los grados de libertad que carecen de término restaurador (en este caso, sólo para sway y a 45º, por ser la dirección de una de las líneas de fondeo).

Para ello, el modelo fondeado en el tanque se desplaza progresivamente (sin salir de la zona lineal) y se mide la fuerza ejercida en la línea por el desplazamiento.

4.3.4. Ensayos con oleaje (regular e irregular)

El objetivo de los ensayos con oleaje regular e irregular es mostrar el comportamiento hidrodinámico global del cuerpo respecto a diferentes estados de mar. Durante estos ensayos se registran las series temporales de todas las variables para poder tener una base de datos suficiente para calibrar el modelo posteriormente.

Las variables registradas y analizadas durante los ensayos con oleaje han sido:

- Movimientos.
- Fuerzas en los tendones.
- Fuerzas en el sistema de fondeo.
- Oleaje incidente generado (superficie libre).

En la Figura 14 muestra la disposición y orientación del modelo y el sistema de fondeo respecto a la geometría del tanque y la dirección del oleaje.

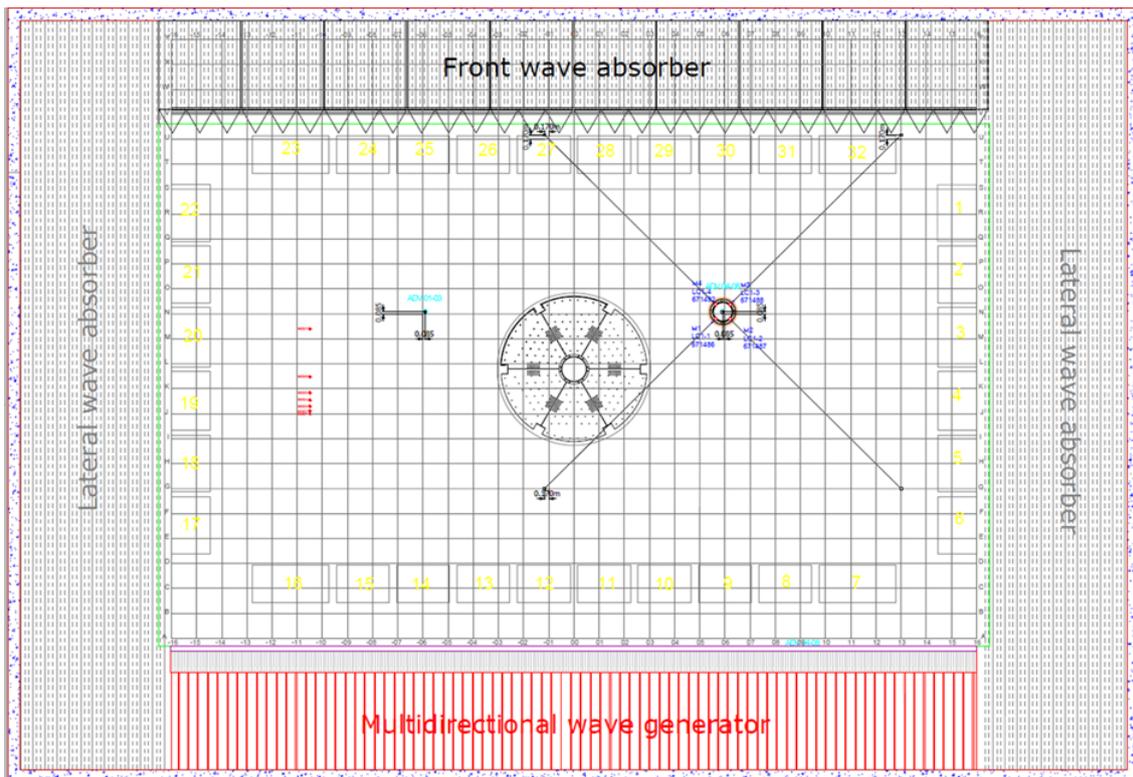


Figura 14: Disposición del modelo en el CCOB, posición fija durante toda la campaña de ensayos (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)

4.3.4.1. Fase 1: Oleaje regular

El objetivo de la fase 1 es determinar la respuesta del modelo en todos sus GdL frente a la excitación de oleajes monocromáticos de pequeña y gran amplitud. Con el oleaje de pequeña amplitud se pretende obtener las RAOs (operador de respuesta en amplitud) de cada GdL para

movimientos con comportamiento lineal mientras que, con el oleaje regular de gran amplitud, se pretende obtener la respuesta frente a un comportamiento no lineal o menos lineal.

Se han lanzado 27 ensayos de **100 olas** por cada oleaje regular. Cada estado de oleaje se ha generado para 3 alturas distintas y para 9 periodos por cada una de las 3 alturas, utilizándose para el cálculo de las RAOs un número determinado de las últimas de cada serie (50 últimas olas). Como se ha comentado, se ha empleado una altura de ola para poder obtener una RAO lineal y otras 2 para poder obtener RAOs no lineales.

Se han realizado tres configuraciones de oleaje regular C01, C02 y C03; con alturas de ola de 1.5m, 3.0m y 5.0m respectivamente. En las tres se han lanzado 8 estados de mar con los siguientes periodos: 5.5, 7, 11, 13, 15, 17 y 19 segundos. Por tanto, se han realizado 24 estados de mar de oleaje regular.

4.3.4.2. Fase 2: Oleaje irregular

El objetivo de la fase 2 es analizar el comportamiento de la estructura frente a estados de mar específicos de operación y de supervivencia (tormentas de 50 o 100 años de periodo de retorno, definido según la normativa).

Con los ensayos de operación mediante oleaje irregular, es posible obtener RAOs espectrales, las cuales nos dan más información de la respuesta de la estructura respecto a comportamientos no lineales que se registren en el ensayo. Con los ensayos de supervivencia, se obtienen las respuestas extremas a las que se verá sometida la estructura, debido a sus movimientos, siendo de especial importancia la obtención de fuerzas generadas en las líneas de fondeo por esos mares de tanta energía.

Se han realizado un total de **8 ensayos de operación** y **5 de supervivencia**, cada uno correspondiente a un estado de mar. Para ello, se han generado **500 olas** para cada estado de mar irregular, con un espectro de oleaje JONSWAP de tres parámetros: Hs (altura significativa en metros), Tp (periodo de pico en segundos) y coeficiente γ (factor de concentración energía del oleaje).

Concretamente se llevaron a cabo los siguientes estados de mar:

Condiciones de Operación:

Tenshores	
C04	
Hs (m)	Tp (s)
1,5	4,5
1,5	6,5
2,5	6,0
2,5	8,0
3,0	6,5
3,0	8,0
3,0	10,0
3,0	13,0

Condiciones de Supervivencia:

Tenshores	
C05	
Hs (m)	Tp (s)
4,5	9,7
5,5	15,5
8,5	15,0
13,4	21,0
13,4	19,0

Tabla 3: Características del oleaje generado: Oleaje Irregular

Los estados de mar extremales (correspondientes a los ensayos de supervivencia) fueron definidos por los investigadores del IHCantabria de acuerdo a 5 estados de mar característicos de ciertos emplazamientos de interés para el proyecto.

4.3.5. Ensayos con corriente

Se realizaron ensayos con corrientes, en ausencia de oleaje. Estos sirven para comprobar el comportamiento hidrodinámico global del cuerpo respecto a diferentes intensidades de corriente. Sin embargo, no se describen en este proyecto ya que no se utilizaron para la posterior calibración del modelo numérico.

4.4. Resultados más relevantes

En este apartado se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante la campaña de ensayos de laboratorio.

4.4.1. Ensayos de caracterización en seco

4.4.1.1. Medición de masas

A continuación, en la Tabla 4, se muestran los pesos totales de los elementos que forman la jaula. Estos valores incluyen tanto las mediciones realizadas durante los ensayos de caracterización en seco como los ajustes en tanque que se realizaron posteriormente (para obtener el calado de proyecto, ajuste de inercias, compensar los aparatos de medida que apoyaban en el modelo, etc.).

Tenshores	
MASAS del modelo	
Item	Masa (kg)
Jaula + Pienso	95,435
Sinker + Lastre Sinker	0,964
Tendones	0,73
Emisor U. Inercial	0,098
Qualisys (bolas y cruceta)	0,056
Lastre Silos	1,491
TOTAL PESO MODELO	98,773
Sólido 1 (Jaula sin Sinker)	97,079
Sólido 2 (Sinker)	0,964

Tabla 4: Masas medidas de los elementos de la jaula

4.4.1.2. Centro de gravedad

A continuación, en la Tabla 5 se muestra un resumen de los valores teóricos y los medidos en laboratorio correspondientes a los distintos centros de gravedad del modelo. Las coordenadas X e Y se toman respecto al eje de revolución de la jaula, mientras que las coordenadas Z se toman respecto a la quilla de jaula (base inferior).

Tenshores			
CdG del Modelo			
Centro de Gravedad X-Y-Z	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Teórico	0,000	0,000	15,900
Laboratorio	-0,145	-0,543	16,399
Multicuerpo			
Tendones	0,000	0,000	-32,400
Sólido 1 (Jaula sin Sinker)	-0,221	-0,521	16,372
Sólido 2 (Sinker)	0,000	0,000	-65,400
Sólido Rígido (Cuerpo Único)			
Jaula + Sinker + Tendones	-0,218	-0,512	15,213

Nota: coordenadas X e Y respecto al eje de revolución de la jaula. Coordenadas Z respecto a la quilla de la jaula

Tabla 5: Centros de gravedad teóricos y medidos para la configuración de lastre nominal

4.4.1.3. Momentos de inercia

A continuación, la Tabla 6 muestra los valores teóricos y medidos en laboratorio correspondientes a los momentos de inercia respecto el centro de gravedad del modelo ensayado.

Tenshores			
Momentos de Inercia			
Momentos de Inercia	Ixx (kg*m2)	Iyy (kg*m2)	Izz (kg*m2)
Teórico	11,390	0,000	15,900
Laboratorio	11,044	-0,543	16,399
Multicuerpo			
Sólido 1 (Jaula sin Sinker)	10,989	10,503	18,702
Sólido 2 (Sinker)	0,055	0,055	0,111
Sólido Rígido (Cuerpo Único)			
Jaula + Sinker	11,044	10,558	19,452

Nota: para Multicuerpo los momentos de inercia de cada cuerpo se toman respecto a sus CdGs. Para Sólido Rígido los momentos se toman respecto al CdG del Sólido Rígido.

Tabla 6: Inercias teóricas y medidas para la configuración del lastre nominal

4.4.1.4. Estanqueidad

El peso de la jaula en seco fue 93.545kg. Después de que el modelo pasara un día flotando en el tanque se comprobó el peso del mismo una vez se extrajo del agua, variando su peso tan solo un 0,12%, valor más que despreciable. De esta forma, se concluyó que la estructura que se construyó era estanca y que podía ser usada para los ensayos en tanque.

4.4.2. Ensayos de caracterización en tanque

4.4.2.1. Ensayos de inclinación

Se realizaron tres repeticiones del ensayo de inclinación. En la Tabla 7 se muestra el valor de la altura metacéntrica media de cada ensayo y el promedio de la media de cada ensayo.

Tenshores		
Ensayo	Altura metacéntrica	
Test	GM	GM promedio
Test 1	1,200	1,211
Test 2	1,208	
Test 3	1,225	

Tabla 7: Resultados altura metacéntrica: Media de cada ensayo (Fuente: Entregable E4 Proyecto Ten-Shores)

El valor de altura metacéntrica es 1,211m, por tanto, la estructura es estable.

4.4.2.2. Ensayos de extinción

En este apartado se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de extinción (decay tests) para cada grado de libertad analizado. Es preciso señalar que los investigadores del IH Cantabria realizaron como mínimo 5 repeticiones del ensayo de cada grado de libertad, para comprobar la coherencia de los resultados. Se realizaron tres configuraciones de ensayo: sin

fondeo y sin sinker, sin fondeo y con sinker y con fondeo y con sinker; pero para la calibración del modelo solo se utilizó la última.

En la Tabla 8 se muestran los periodos propios obtenidos en el ensayo de extinción:

Tenshores				
Periodos propios de la estructura (con fondeo + con sinker)				
Ensayo	T11/T22 (s)	T33 (s)	T44/T55 (s)	T66 (s)
Decay test 1	204,380	15,750	17,980	83,350
Decay test 2	205,770	16,100	18,020	83,440
Decay test 3	208,340	15,720	18,350	83,370
Decay test 4	207,920	16,030	18,060	83,390
Decay test 5	205,940	15,830	18,280	83,370
Valor medio	206,470	15,886	18,138	83,384

Tabla 8: Resultados de periodos propios del ensayo

A continuación, se muestra un ejemplo de las series temporales registradas durante un ensayo de extinción para el grado de libertad heave.

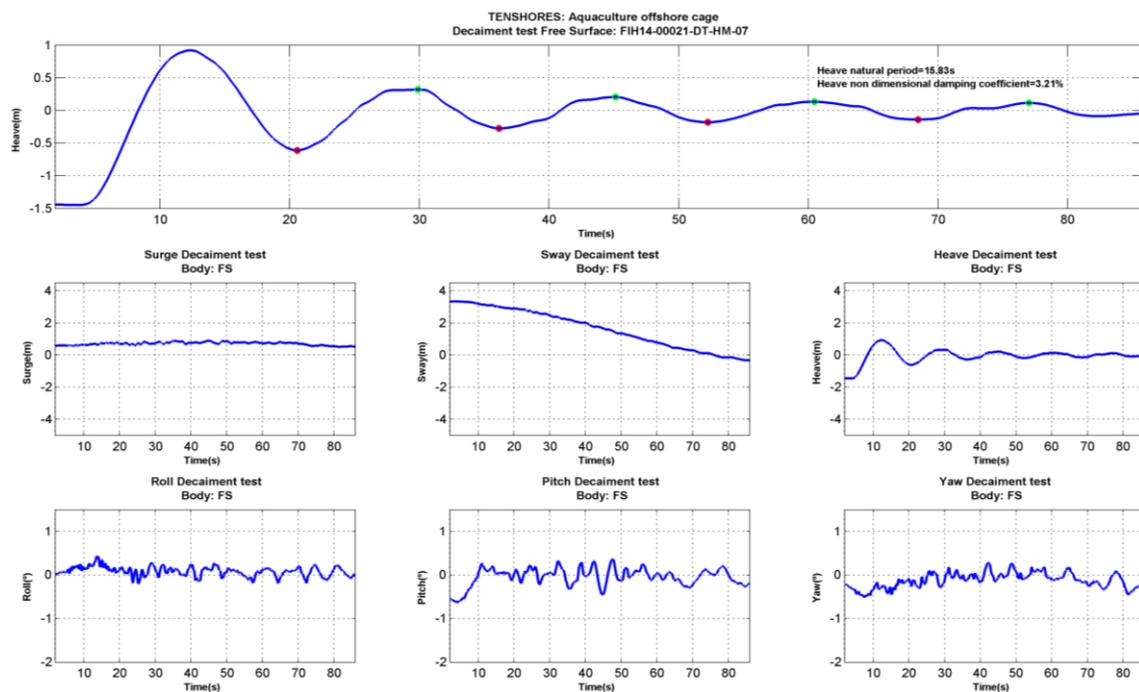


Figura 15: Serie temporal – Ensayos de extinción de jaula con sistema de fondeo y con sinker – Heave

4.4.2.3. Ensayo offset estático

En este apartado se presenta un resumen de los resultados obtenidos para los grados de libertad analizados: configuración para sway y configuración a 45º (dirección de dos de las líneas de fondeo).

La Figura 16 muestra los resultados obtenidos en los ensayos para los dos GdL, representando el desplazamiento (en el eje de abscisas) frente a la fuerza (en el eje de ordenadas), dando lugar a la curva de rigidez del sistema de fondeo mediante una aproximación de curva que pasa por los puntos.

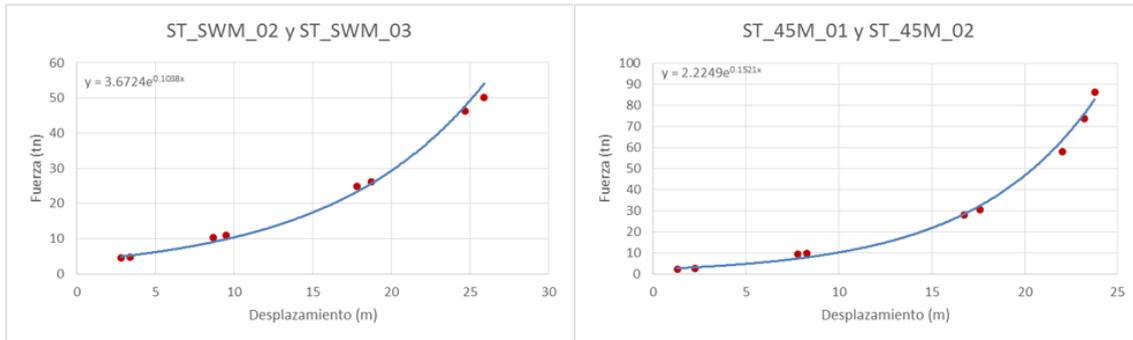


Figura 16: Superposición de puntos obtenidos en ambos ensayos para cada configuración de offset estático. Aproximación exponencial a los puntos: Sway (izquierda) y a 45º (derecha)

4.4.3. Ensayos en tanque

4.4.3.1. Fase 1: Oleaje regular

En este apartado se van a presentar los resultados más relevantes, en materia de este proyecto, de los ensayos de oleaje regular, ya que no es el fin del presente proyecto centrarse en las bases de datos obtenidas en laboratorio, sino identificar la información de interés y saber interpretarla para poder utilizarla en la calibración del modelo.

En la Figura 17 se muestran los operadores de respuesta en amplitud, RAOs (Response Amplitude Operator), de los 6 GdL de las tres configuraciones de oleaje regular (correspondientes a las 3 alturas de ola); así como los periodos propios de heave (T33), roll (T44) y pitch (T55). En esta gráfica se aprecia como las RAOs son mayores cerca de los periodos propios, ya que en el caso de que el periodo del oleaje coincidiera con el periodo propio de la estructura en alguno de sus GdL, la estructura entraría en resonancia.

Motions: Center of Gravity (CoG)
Global Analysis (Regular waves): RAO Comparison

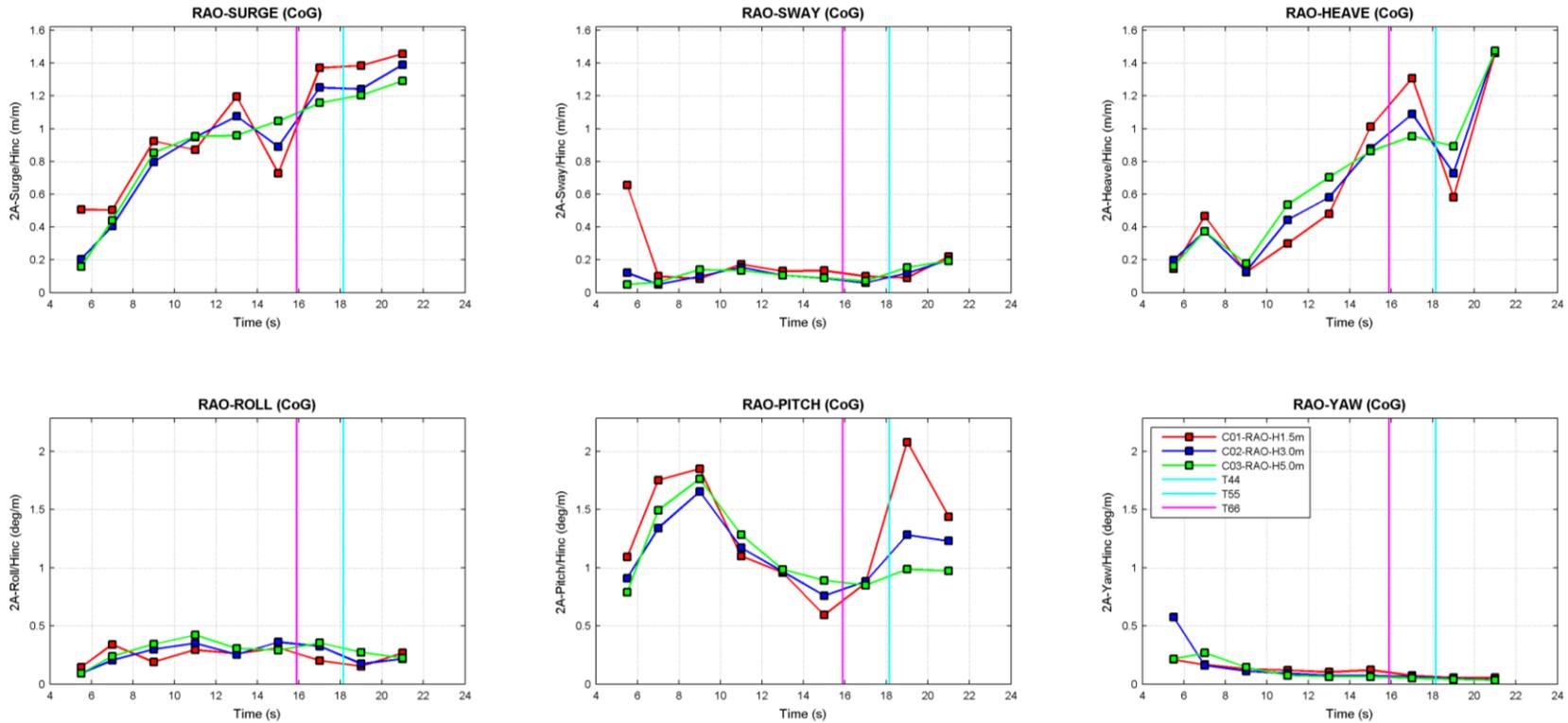


Figura 17: Oleaje Regular: RAO movimientos

4.4.3.2. Fase 2: Oleaje irregular

Al igual que en el apartado anterior, se van a presentar los resultados más relevantes de los ensayos de oleaje irregular.

En la Figura 18 y Figura 19 muestran las RAOs espectrales de los GdL para los oleajes irregulares de operación y supervivencia respectivamente.

Como un extra del ensayo, a modo de comprobación, se ejecutó un **ensayo de ruido blanco** (White noise) en el que las palas del tanque generan un espectro de oleaje con la misma energía para cada frecuencia, pudiendo obtener una RAO espectral de los GdL.

TENSHORES: Aquaculture offshore cage

Motions: Center of Gravity (CoG)

Global Analysis (C04 - Irregular Waves - Operational Sea States): SPECTRAL Response Amplitude Operator

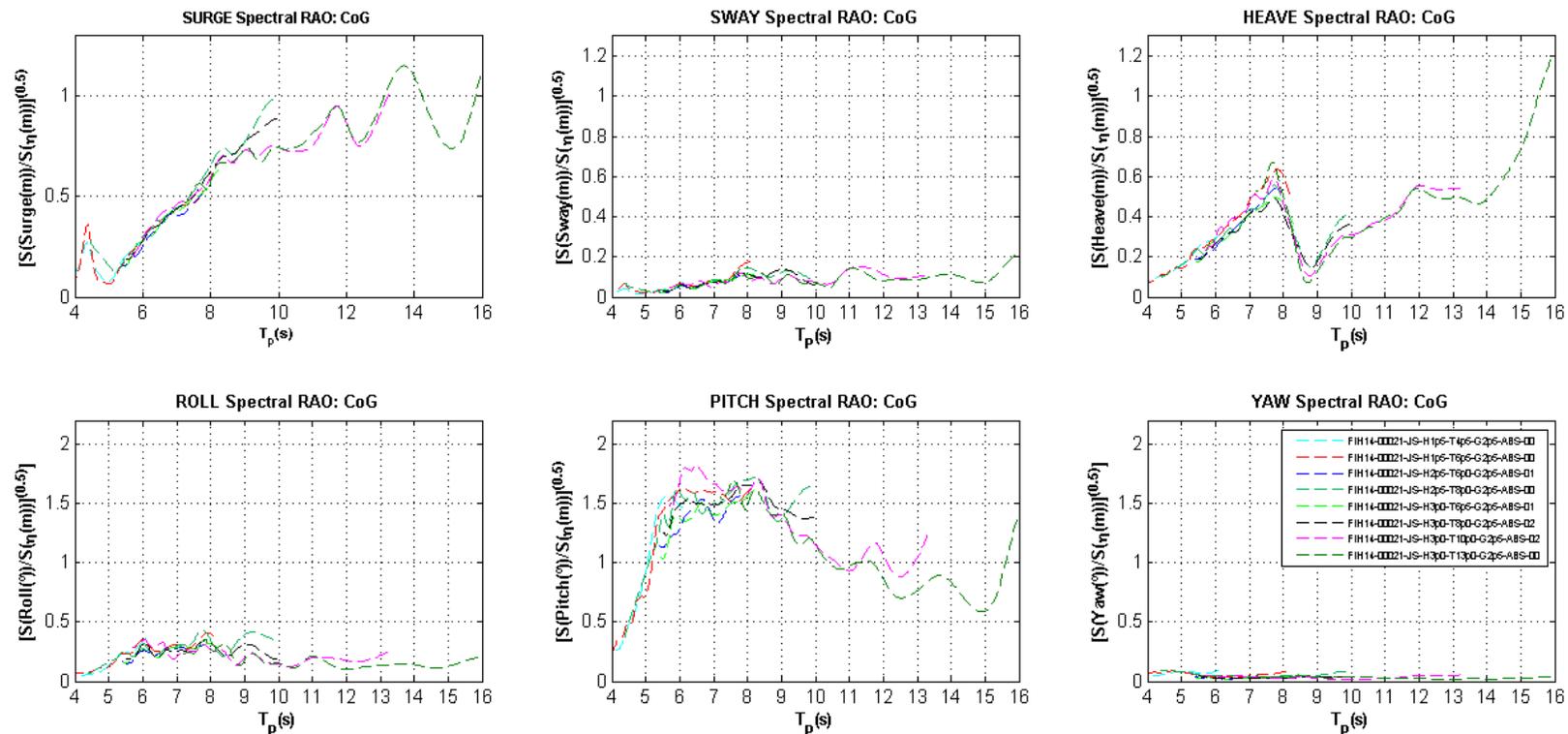


Figura 18: Oleaje Irregular – Condiciones de operación: RAO espectral de GdL

Motions: Center of Gravity (CoG)

Global Analysis (C05 - Irregular Waves - Survival Sea States): SPECTRAL Response Amplitude Operator

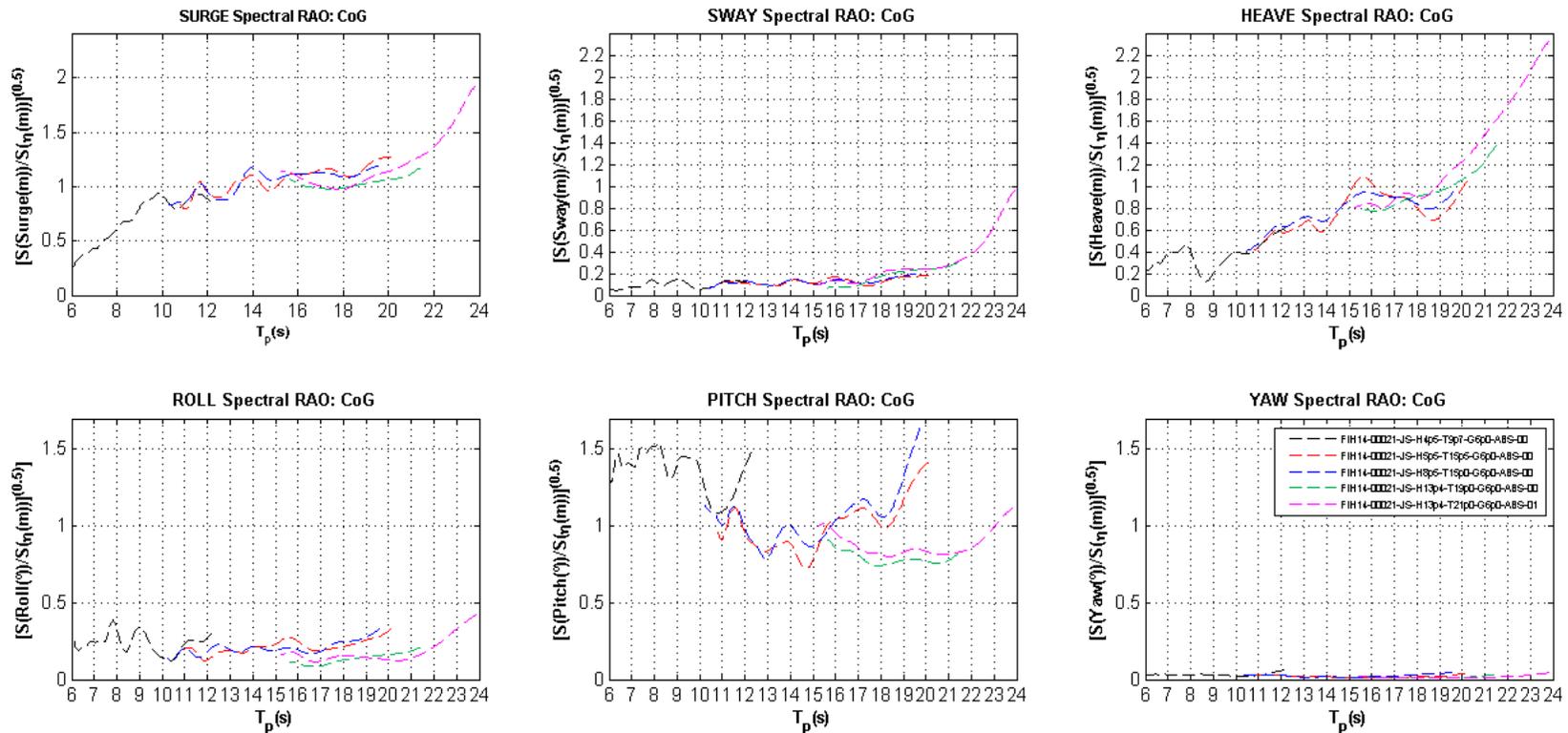


Figura 19: Oleaje Irregular – Condiciones de supervivencia: RAO espectral de GdL

5. NUMÉRICO

5.1. Descripción del modelo numérico

El **objetivo** del modelo numérico es obtener tanto la posición de la estructura flotante a lo largo del tiempo frente a unas condiciones meteoceánicas determinadas como las fuerzas producidas en los tendones y en las líneas de fondeo del modelo.

Para modelar el movimiento de una estructura flotante en el dominio del tiempo se utiliza la **ecuación de Cummins**, que tiene en cuenta tanto las fuerzas de excitación producidas por el oleaje que incide sobre la estructura como las fuerzas de radiación producidas por el propio movimiento de la estructura.

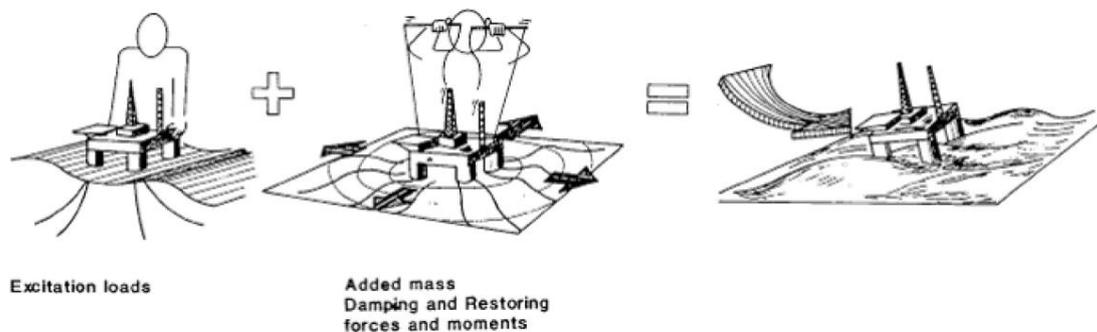


Figura 20: Fuerzas de excitación y radiación en una estructura flotante (Faltinsen, 1993)

Por tanto, el modelo numérico acoplado desarrollado en el proyecto combina tres modelos numéricos de forma simultánea, que son:

- Modelo numérico hidrodinámico basado en la ecuación de Cummins.
- Modelo numérico de sistema de fondeo.
- Modelo numérico de sistema de tensores/tendones.

Previamente a la utilización del modelo y con el objetivo de describir el comportamiento cinemático del medio para obtener la información necesaria para alimentar la ecuación de Cummins, se utiliza la **teoría de flujo potencial**, a la cual se llega a partir de las ecuaciones de Navier – Stokes realizando una serie de simplificaciones, es decir, se considera fluido ideal.

5.1.1. Teoría de flujo potencial

El modelado del comportamiento del cuerpo en el mar se ha formulado a partir de la teoría de flujo potencial.

Los efectos de la viscosidad de los fluidos reales quedan limitados a las regiones del espacio (muchas veces pequeñas) donde tienen lugar fuertes gradientes de la velocidad (capas límite, o regiones donde el flujo es turbulento). En el grueso del flujo los efectos de la viscosidad son despreciables y el fluido se puede suponer ideal (Miranda, 2011).

En el modelo numérico utilizado en este proyecto se han realizado una serie de simplificaciones, para evitar el gran coste computacional que requiere la resolución de las ecuaciones de Navier – Stokes, hasta llegar a simular el flujo como un flujo ideal, es decir, incompresible e irrotacional (Armesto, de los Dolores, & Guanche, El modelado numérico como herramienta en el estudio de energías renovables marinas, 2016). Partiendo de las leyes constitutivas de conservación de la masa y conservación de momentos (lineales) se consigue simplificar el problema.

Ecuaciones de Navier – Stokes:

Ley de conservación de la masa:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0$$

Ley de conservación de momentos (lineales):

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} + \vec{\nabla}p + \rho \cdot \text{div}(T_r) = \rho \cdot \vec{f}$$

Simplificaciones:

- Flujo incompresible (lo que implica que la densidad es constante a lo largo del tiempo):

Ley de conservación de la masa:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \text{div}(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \rightarrow \text{div}(\vec{V}) = 0$$

- Para el uso de teoría potencial, consideraremos la viscosidad nula. Si bien es cierto que esta hipótesis sólo es válida para número de Reynolds suficientemente grandes, considerarlo así permite simplificar en gran medida el problema y así resolverlo con un menor coste computacional, lo que equivale a un menor tiempo de cálculo.

Al considerar la viscosidad nula se obtiene:

Ley de conservación de momentos (lineales):

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} + \vec{\nabla}p + \rho \cdot \text{div}(T_r) = \rho \cdot \vec{f} \rightarrow \rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} + \vec{\nabla}p = \rho \cdot \vec{f}$$

- Además, se ha considerado que el flujo es irrotacional:

$$\text{rot}(\vec{v}) = 0 \rightarrow \exists \varphi \in \mathbb{R} \text{ tal que } v = \nabla\varphi$$

Aplicando estas simplificaciones, se llega a la Ecuación de Laplace (teoría potencial):

$$\Delta\varphi = \nabla \cdot (\nabla\varphi) = 0$$

Con estas simplificaciones se pierde información tal como:

- Separación de flujo.
- Vorticidad o rotacionalidad.
- Las fuerzas viscosas.

Se puede suplir la presencia de estos efectos mediante la inclusión de unos términos denominados coeficientes de amortiguamiento o damping que traten de compensar las

simplificaciones realizadas (Iturrioz, y otros, 2014). Es decir, debido a las simplificaciones realizadas para llegar a una ecuación capaz de calcular en un periodo de tiempo razonable, se han obviado efectos importantes que sí estarán presentes en la realidad (fricción, viscosidad, amortiguamiento, etc.). Lo que se pretende conseguir con la introducción de estos coeficientes de damping, que serán precisos calibrar con ensayos de laboratorio, es acercarnos más a lo que pueda ser la realidad en el comportamiento del cuerpo.

Para resolver esta ecuación de flujo ideal existen varios métodos:

- Métodos de resolución indirectos: como por ejemplo “Métodos de singularidades” o “Métodos de variable compleja”.
- Métodos de resolución directos: como por ejemplo “Métodos Analíticos”, “Métodos gráficos de redes de flujos”, “Métodos analógicos” o, el “Método de elementos de contorno” (Boundary Element Method, BEM), que es el método más utilizado y el que resuelve NEMOH y WADAM. En este proyecto concretamente se ha utilizado la herramienta NEMOH, basado en BEM, para la resolución del modelo.

5.1.2. Ecuación de Cummins

Para la determinación del comportamiento teórico de la plataforma objeto de estudio, se emplea un modelo numérico basado en la ecuación de Cummins en el dominio del tiempo. Mediante esta ecuación se puede modelar el movimiento de una estructura flotante en el dominio del tiempo:

$$(M + A_{\infty})\ddot{x}(t) + \int_0^t K(t - \tau)\dot{x}(\tau)d\tau + Cx(t) = \sum F(t)$$

Dicha ecuación utiliza los resultados obtenidos a partir de teoría de flujo potencial, propiedades másicas e inerciales de la estructura, su rigidez hidrostática, fuerzas de amortiguamiento lineales y no lineales y otros efectos debidos a fuerzas exteriores (entre las que se encuentran las fuerzas generadas por el sistema de fondeo y el sistema de tendones).

En dicha ecuación, " M " es la matriz de masas correspondiente a la estructura y " A_{∞} " es la masa añadida a frecuencia infinita, es decir, la masa que arrastra la estructura en su movimiento además de la propia. Por otra parte, " $x(t)$ " es el vector de incógnitas que incluye los 12 DOFs de la plataforma. " $K(t)$ " representa la memoria del fluido; es decir, la respuesta que presenta el cuerpo ante estímulos pasados (IRF). Este término $\int_0^t K(t - \tau)\dot{x}(\tau)d\tau$ representa las fuerzas de amortiguación (added damping) que se producen por la radiación de ondas que origina el cuerpo flotante al moverse. Estas fuerzas son hidrodinámicas, como lo son las de excitación (incidentes + dispersadas por la estructura supuesta fija). " C " es el coeficiente hidrostático de restauración, y $\sum F(t)$ el sumatorio de fuerzas actuantes exteriores referidas a un determinado momento, donde están incluidas las de las olas, los anclajes, la fricción...

La ecuación de Cummins es una ecuación diferencial de segundo orden que incluye una integral de convolución: $\int_0^t K(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau$. La presencia de la integral de convolución hace muy complicada la resolución de la ecuación en el dominio del tiempo. Hay varios métodos de resolución de esta integral (Armesto, Guanche, del Jesus, Iturrioz, & Losada, 2015):

- Solución directa de la integral de convolución (IRF). Este es el que se ha empleado en este proyecto.
- Aproximación del término de radiación mediante un state – space.
- Aproximación de la función de respuesta al impulso (irf) mediante una suma de exponenciales complejas usando el método Prony.

5.1.3. Interpretación de la ecuación de Cummins

La ecuación de Cummins corresponde a la aplicación de la segunda ley de Newton:

$$m \cdot \ddot{x} = \sum F$$

En donde el sumatorio de fuerzas incluye las siguientes fuerzas:

- Fuerza de radiación: $F_{rad} = A_{\infty} \cdot \ddot{x} + \int K \cdot \dot{x} \cdot d\tau$. Esta fuerza se obtiene aplicando teoría potencial mediante el uso de la herramienta NEMOH, empleando las simplificaciones comentadas anteriormente.

La masa añadida calculada debe verificar que se cumple lo siguiente para cada dominio de frecuencias (ω_j):

$$A(\omega_j) = A_{\infty} - \frac{1}{\omega_j} \int_0^{\infty} K(t) \sin(\omega_j \cdot t) dt$$

Sin embargo, con los datos proporcionados por la teoría potencial no es posible obtener el valor de A_{∞} requerido en la ecuación anterior. Por este motivo se emplea el término $A_{\infty}(\omega_j)$:

$$A_{\infty}(\omega_j) = A(\omega_j) + \frac{1}{\omega_j} \int_0^{\infty} K(t) \sin(\omega_j \cdot t) dt$$

Así, el valor a introducir en la ecuación de Cummins será el valor medio de la masa añadida infinita $A_{\infty}(\omega_j)$, lo cual puede provocar que el periodo natural computado para el modelo numérico difiera algo del observado en los ensayos de laboratorio. Por esta razón se introduce un nuevo coeficiente de calibración en el modelo, con el fin de ajustar el periodo obtenido por el modelo a la realidad. A este nuevo coeficiente lo llamaremos coeficiente de masa añadida, A.

- Fuerza hidrostática: $F_{hydro} = C \cdot x$. La matriz C se obtiene directamente según la geometría de la estructura en reposo.

- Fuerzas de oleaje: $F_{oleaje} = \sum F_w \cdot \eta(t, x)$. Esta fuerza está compuesta por dos términos: la descomposición espectral de la superficie libre para cada frecuencia del oleaje incidente al cuerpo y la fuerza de cada frecuencia de oleaje obtenida a partir de la teoría potencial mediante la herramienta NEMOH.
- Fuerzas de las líneas de fondeo (moorings). Esta fuerza es la fuerza originada por el sistema de fondeo. Se puede resolver mediante dos modelos numéricos:
 - *Modelo Cuasiestático*: resuelve un sistema estático suponiendo que la línea de fondeo tiene forma de catenaria partiendo de las posiciones inicial y final de los dos extremos.
 - *Modelo Dinámico*: emplea un Modelo de Elementos Finitos (FEM), que resuelve una ecuación en derivadas parciales (EDP) mediante un sistema de EDOs de segundo orden con 3 DOFs por cada nodo, ya que se analiza el movimiento en el espacio 3D. Este método resuelve la dinámica de cada línea de catenaria, dividiendo la línea en nodos (en este caso 20 nodos cada catenaria), y teniendo en cuenta que uno de los extremos es móvil (el que se conecta a la jaula) y el otro es fijo, el cual corresponde al ancla.

El gran inconveniente de este método es su coste computacional, por lo que se van a comparar los resultados obtenidos por ambos métodos para evaluar, en función del error obtenido, si es posible modelar el comportamiento de la estructura mediante el uso del método cuasiestático.

- Fuerzas en los tendones. Esta fuerza solo se puede obtener mediante el modelo numérico dinámico, puesto que no es posible representar el tendón mediante una catenaria como haría el modelo cuasiestático. Está basado en el modelo de sistema de fondeo dinámico, con la singularidad de que ambos extremos son móviles, ya que uno está conectado a la jaula y el otro al lastre toroidal.
- Fuerzas de fricción: $k_l \cdot \dot{x} + k_{nl} \cdot \dot{x} \cdot |\dot{x}|$. Esta fuerza es la que se va a calibrar para corregir las simplificaciones introducidas a la hora de resolver la teoría potencial. El término “ k_l ” es el coeficiente lineal y “ k_{nl} ” el coeficiente no-lineal, los cuales se van a calibrar hasta llegar, para cada grado de libertad, al modelo que más se ajuste a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. Siendo el objetivo final de este modelo llegar a determinar los valores de estos coeficientes k_l y k_{nl} que representen el comportamiento de esta plataforma para cualquier periodo y altura de oleaje.

Todo ello se integra en un único modelo numérico acoplado y se resuelve simultáneamente para obtener tanto la posición de la jaula como las fuerzas tanto en el sistema de fondeo como en el sistema de tendones.

5.2. Metodología

En este apartado se describe la metodología general utilizada en el proceso de calibración, es decir, las simulaciones realizadas y los inputs que se introducen al modelo.

Como se ha comentado en el apartado “5.1.3 Interpretación de la ecuación de Cummins”, el modelo numérico puede resolver el sistema de fondeo mediante un modelo cuasiestático o mediante un modelo dinámico y el sistema de tendones solo mediante un modelo dinámico.

El modelo está formado por dos cuerpos, jaula y sinker, unidos mediante el sistema de tendones. El coste computacional de la resolución del modelo para la interacción de dos cuerpos que se mueven indistintamente es mucho mayor que la de un solo cuerpo. Si a esto se le suma la resolución del modelo dinámico del sistema de fondeo y de tendones, la duración de las simulaciones es mucho mayor. Por este motivo se ha estudiado también el análisis de la estructura como un sólido rígido, es decir; la jaula, el sinker y los tendones forman un único cuerpo. De esta forma se pueden comparar los resultados obtenidos de cada simulación y justificar si se podría o no utilizar un modelo simplificado para representar el comportamiento en el mar de esta estructura.

Por tanto, se han realizado estas tres simulaciones durante todo el proceso de calibración:

- Sólido rígido con modelo cuasiestático (RigidBody-Quasistatic).
- Sólido rígido con modelo dinámico (RigidBody-Dinamic).
- Multicuerpo con modelo dinámico (MultiBody – Dynamic).

La estructura Multicuerpo solo se puede resolver mediante el modelo dinámico porque, como se comentó anteriormente, el sistema de tendones no se puede resolver mediante el modelo cuasiestático. Sin embargo, en la estructura RigidBody, puesto que los tendones están incluidos dentro del sólido rígido, el modelo numérico solo tiene que resolver el sistema de fondeo, y éste sí se puede resolver mediante cualquiera de los dos modelos, tanto cuasiestático como dinámico.

Además, puesto que la estructura Multicuerpo está formada por la jaula y el sinker, tendrá 12 GdL, los 6 correspondientes a la jaula y los 6 correspondientes al sinker. Teniendo esto en cuenta, la estructura RigidBody solo tendrá 6.

5.3. Calibración/Validación del modelo

5.3.1. Introducción

La calibración y validación del modelo numérico se realiza para poder ajustar el modelo desarrollado por los investigadores del IHCantabria al comportamiento real que presenta la plataforma objeto de estudio bajo la acción del oleaje, con el fin de tener un modelo numérico sólido capaz de reproducir el comportamiento de dicha plataforma para cualquier estado de mar. Para ello se ha empleado la base de datos obtenida durante la campaña de ensayos de laboratorio, con el fin de ajustar el modelo numérico, haciendo coincidir los resultados obtenidos del mismo con los datos experimentales obtenidos en el tanque.

Como se comentó en el apartado 5.1.1 Teoría de flujo potencial, se han realizado ciertas simplificaciones en el modelo numérico debido al gran coste computacional que requiere la

resolución de las ecuaciones de Navier – Stokes. Por este motivo, y como se explicó anteriormente, es necesario incluir unos coeficientes de damping y un coeficiente de masa añadida.

La metodología de calibración y validación se puede resumir de la siguiente forma:

1. Obtención de equilibrio inicial.
2. Calibración de ensayos de extinción (decay tests).
3. Calibración y validación de oleajes regulares.
4. Validación de oleajes irregulares.

Cada uno de estos pasos se ha realizado tanto para multicuerpo como para sólido rígido.

5.3.2. Obtención del equilibrio inicial

El primer paso de la calibración del modelo es la obtención del equilibrio inicial, es decir, la posición en reposo de la jaula y sinker.

Mediante la ejecución de éste primer paso se obtiene la posición inicial tanto de la jaula como el sinker y las tensiones iniciales en el sistema de fondeo y en los tendones (en el caso de multicuerpo). Partiendo de la posición inicial en el resto de ensayos se evita el ruido que se produce en los primeros instantes de la simulación. Además, también se utiliza para ajustar los pesos de las catenarias y tendones, ya que cuando se realizó el modelo se les asignó un peso estimado, es decir, el esperado a escala real. Sin embargo, debido a las pequeñas dimensiones del modelo, el peso en laboratorio de estos elementos difiere del estimado previamente. Por esta razón es necesario ajustarlo introduciendo un coeficiente denominado m .

5.3.2.1. Metodología

El procedimiento consiste en lanzar una simulación de oleaje de amplitud cero a la estructura en reposo. Se establece la duración de la simulación de manera que la estructura alcance una posición de equilibrio, en la cual las oscilaciones se reduzcan notablemente. Para esto, se establecieron 375 segundos duración suficiente para alcanzar el equilibrio.

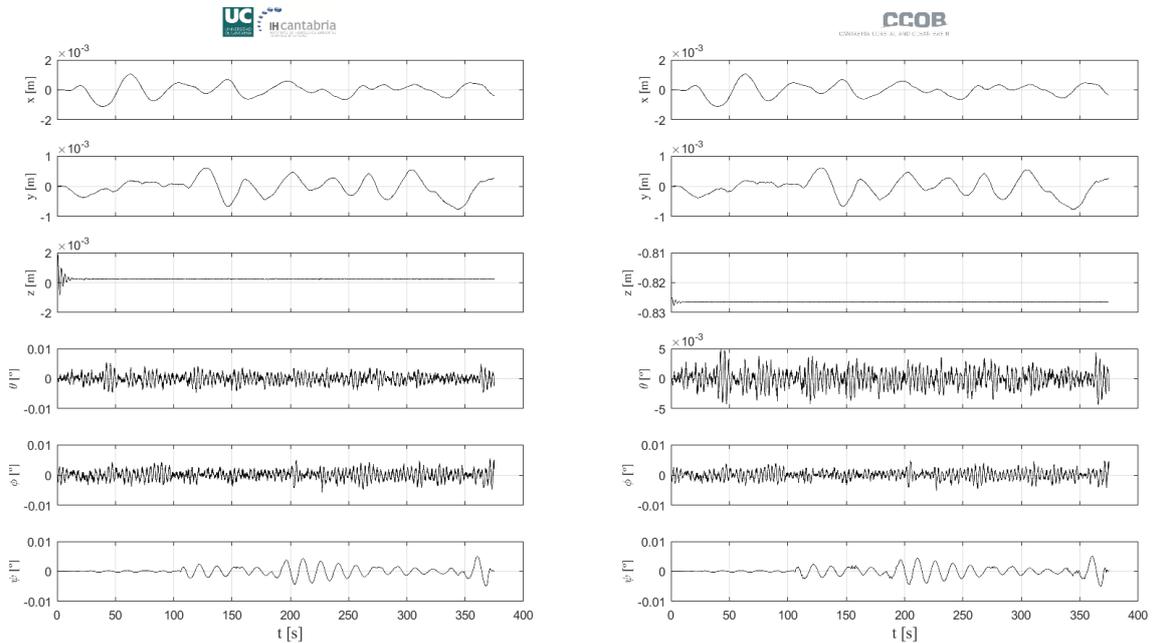


Figura 21: Series temporales de todos los GdL de jaula y sinker respectivamente. Configuración Multicuerpo Dinámico

Como se puede ver en la Figura 21, todos los grados de libertad oscilan en rangos muy pequeños de amplitud. Concretamente en heave, se ve como llega a una posición de equilibrio, con una amplitud del orden de 10^{-3} m.

Para ajustar el peso de las líneas de fondeo, se calibran cuatro fuerzas verticales, de igual valor, aplicadas en los cuatro puntos donde se anclan las líneas de fondeo a la jaula. Se busca que este valor, denominado m , coloque a la plataforma en su línea de flotación de diseño; para ello se observa el GdL heave y se busca que la amplitud tienda a 0. Para cada caso de ensayo se realizan una serie de simulaciones para poder calibrar este coeficiente.

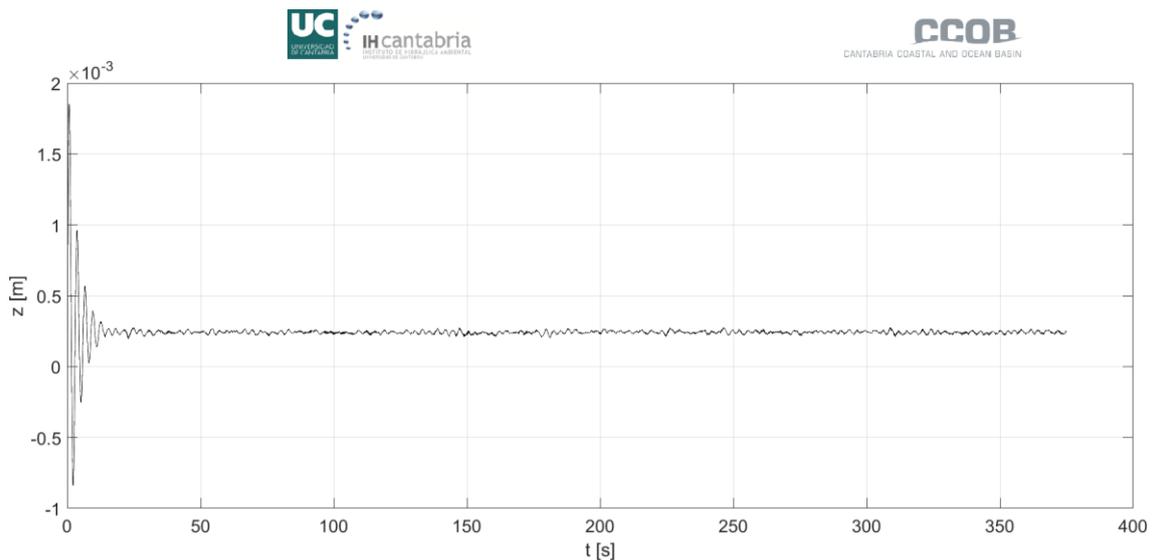


Figura 22: Serie temporal del GdL Heave. Configuración Multicuerpo Dinámico

5.3.2.2. Resultados

Cómo se puede apreciar en la Figura 22, se ha conseguido llegar a tal objetivo, ya que el orden de magnitud de la amplitud en heave es de 10^{-4} m. Este resultado se ha conseguido para los siguientes valores de m:

Sólido Rígido	Multicuerpo
-0.01	-0.025

Tabla 9: Valores del coeficiente m

Son diferentes ya que en sólido rígido están incluidos los tendones en el modelo y, por tanto, hay que ajustarlos también; mientras que en la estructura multicuerpo no se tienen en cuenta.

5.3.3. Calibración de ensayos de extinción (decay tests)

Para la calibración de los ensayos de extinción (decay tests) utilizaremos la base de datos de laboratorio correspondiente a estos ensayos.

El ensayo de extinción, como se explicó en el apartado “4.3.3.2 Ensayos de extinción (Decay test)”, consiste en alterar la posición de equilibrio de la estructura mediante una fuerza exterior para cada uno de los grados de libertad. Una vez alterada, se libera dejando que oscile libremente hasta volver a alcanzar la posición inicial de equilibrio.

En el caso del modelo numérico, con el objetivo de poder comparar los resultados con los obtenidos en laboratorio, la perturbación aplicada es un movimiento igual al que se registró en el ensayo de laboratorio, así ambos partirán de la misma posición. Con esto se pretende calibrar tanto los periodos propios como los coeficientes de amortiguamiento en cada uno de los GdL de interés de la estructura, en este caso se calibrarán los 6 GdL correspondientes a la jaula en el caso de multicuerpo y los 6 GdL de la estructura completa en el caso de sólido rígido.

5.3.3.1. Metodología

En primer lugar, se lanzará una simulación previa en el caso de multicuerpo (*equilibrio decay*), que consiste en desplazar la jaula a la posición de partida del decay test, dejarla quieta para un oleaje de amplitud cero y registrar el movimiento del sinker hasta que éste llegue a una posición de equilibrio. De esta manera conoceremos la posición de partida del sinker y evitaremos “ruido” en la señal que se produciría en los primeros segundos de la simulación.

La duración de la simulación dependerá del tiempo que tarda la estructura en volver a su posición de equilibrio durante el ensayo de laboratorio.

El primer paso es calibrar el periodo propio de la estructura, modificando el coeficiente de la masa añadida, A. Para ello, se lanzan una serie de valores que proporcionen un barrido de posibles coeficientes. La calibración finalizará cuando el periodo del modelo numérico coincida con el periodo propio de la estructura recogido en los ensayos.

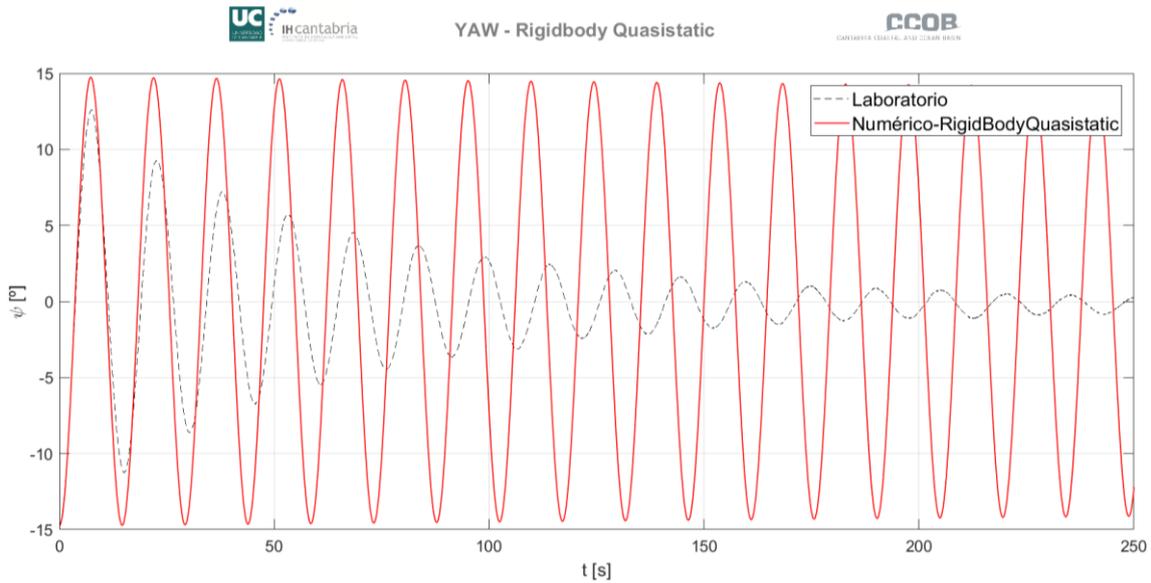


Figura 23: Decay test para el GdL Yaw. Coeficiente de masa añadida, A, sin calibrar

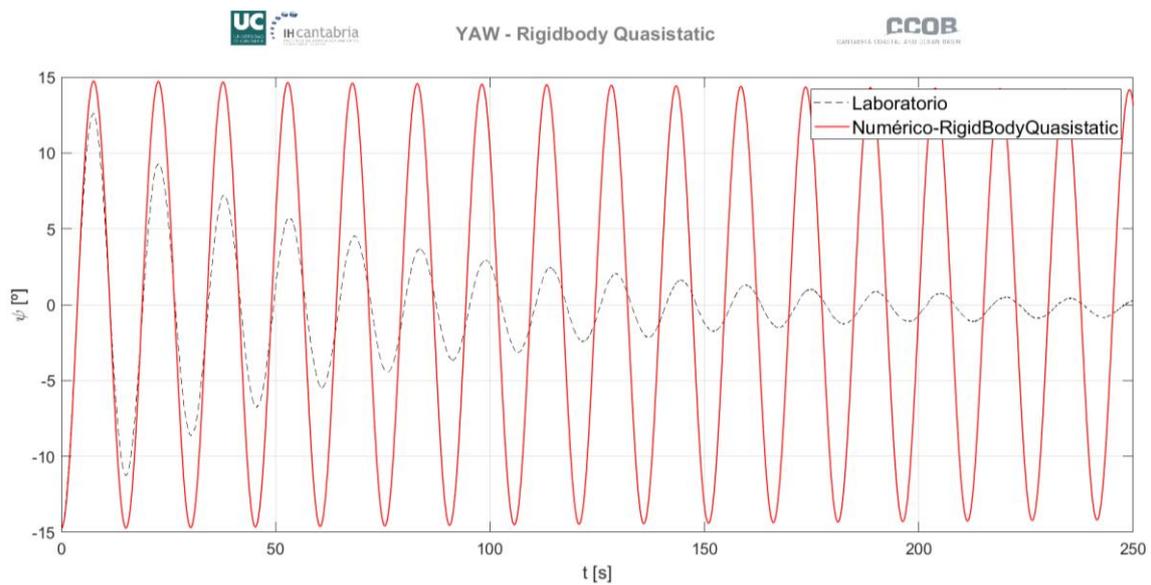


Figura 24: Decay test para el GdL Yaw. Coeficiente de masa añadida, A, calibrado

Una vez calibrado el periodo propio de la estructura para cada uno de los GdL y para cada estructura, se procede a calibrar la amplitud de las oscilaciones del modelado numérico. Para ello se modificarán los coeficientes de amortiguamiento lineal y no lineal, k_l y k_{nl} respectivamente. Al ser coeficientes de amortiguamiento, cuanto mayor sean menor será la amplitud de las oscilaciones.

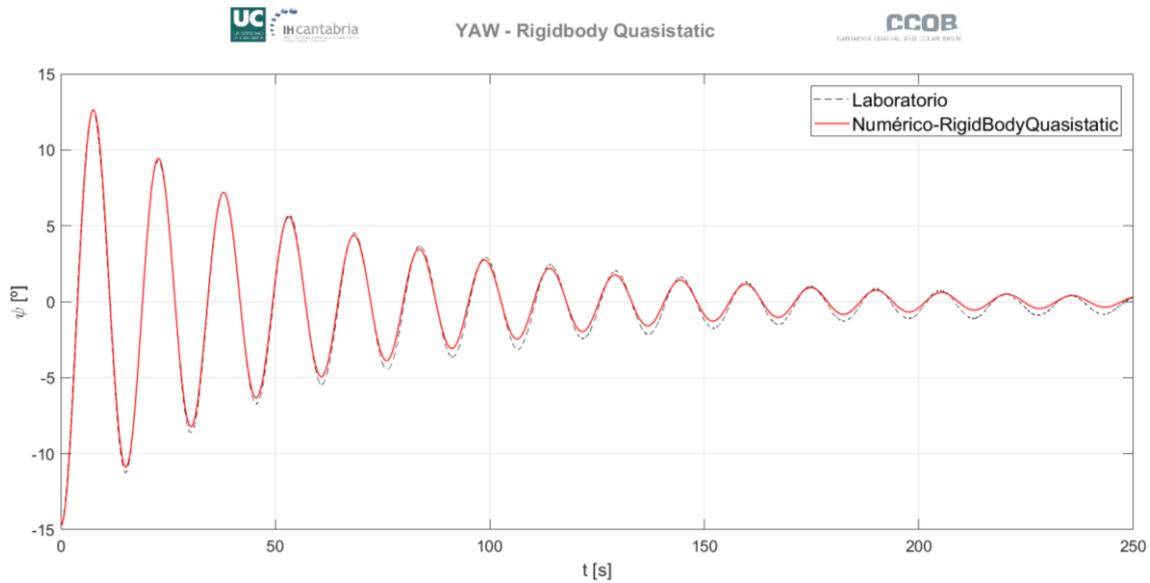


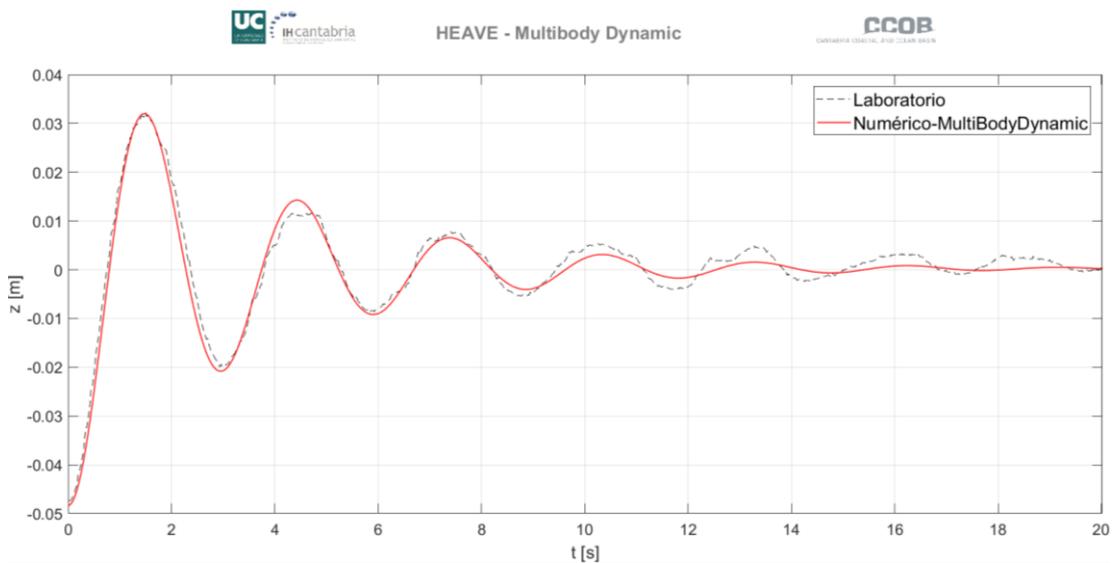
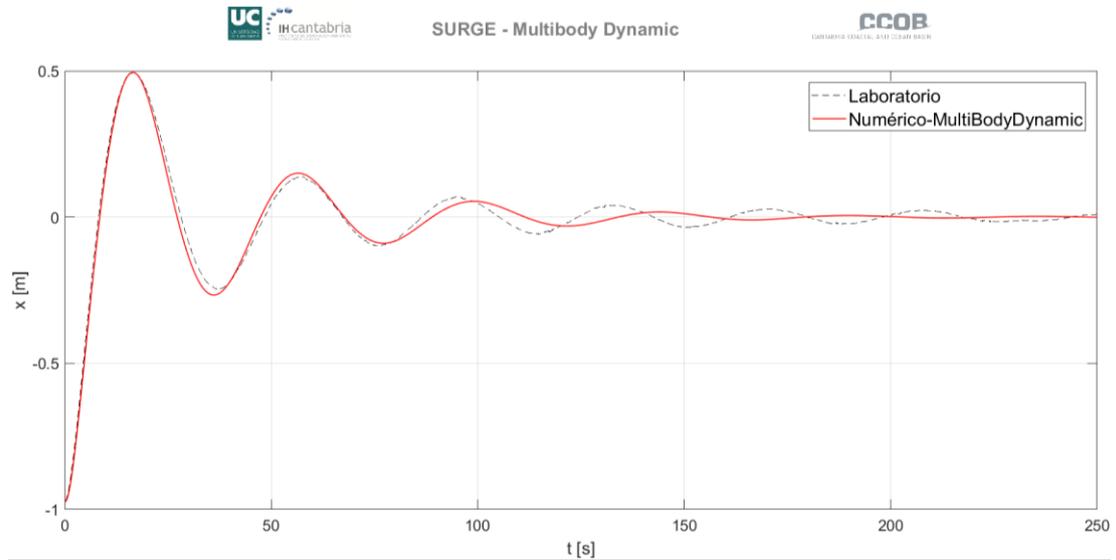
Figura 25: Decay test para el GdL Yaw. Calibrados A , k_l y k_{nl}

En general, el coeficiente de amortiguamiento no lineal, k_{nl} , afecta a la parte inicial de la simulación, donde los desplazamientos son muy grandes y la velocidad mayor. Una vez que el movimiento se va amortiguando y las amplitudes son más estables la velocidad disminuye de manera constante y se produce un amortiguamiento más lineal, por lo que la parte final estará afectada por el coeficiente de amortiguamiento lineal, k_l .

5.3.3.2. Resultados

Dada la doble simetría de la estructura, las simulaciones de los GdL surge y sway son iguales, con iguales coeficientes de masa añadida y amortiguamiento. Ocurre lo mismo con los GdL roll y pitch. Por esta razón, en los siguientes resultados solo se mostrarán los GdL surge, heave, pitch y yaw.

Multicuerpo Dinámico



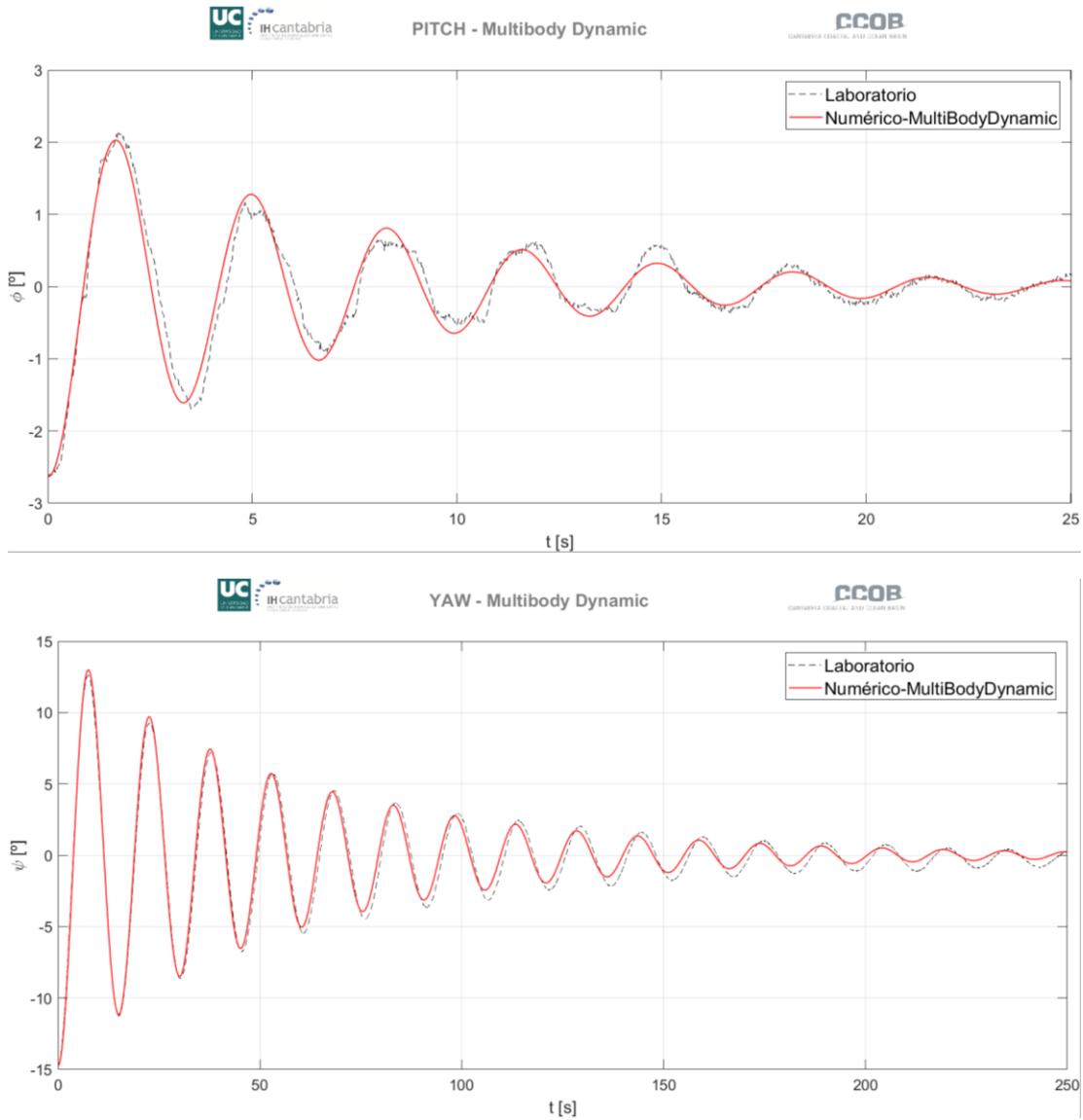
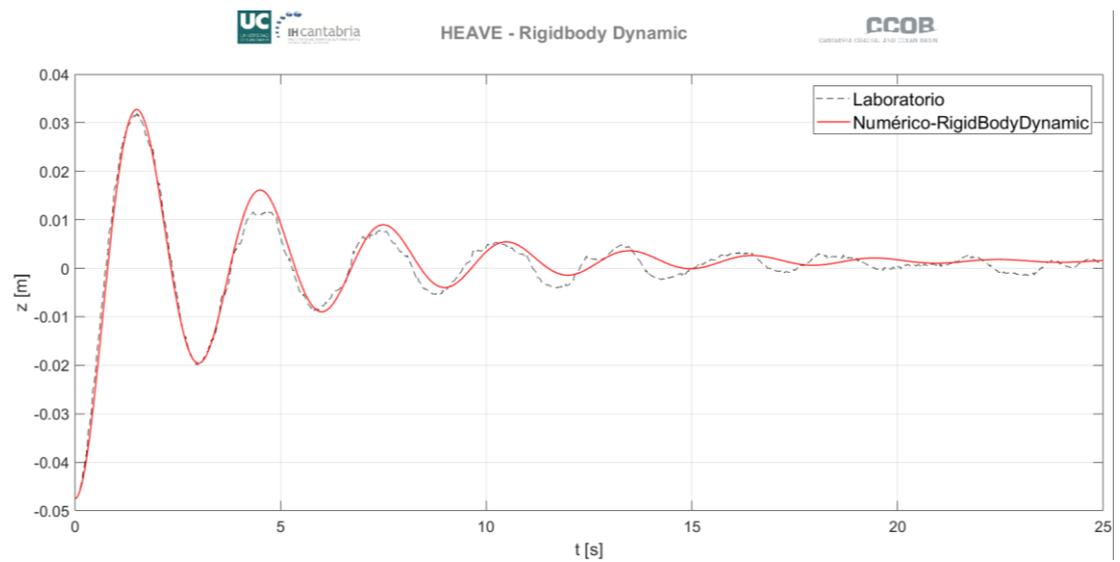
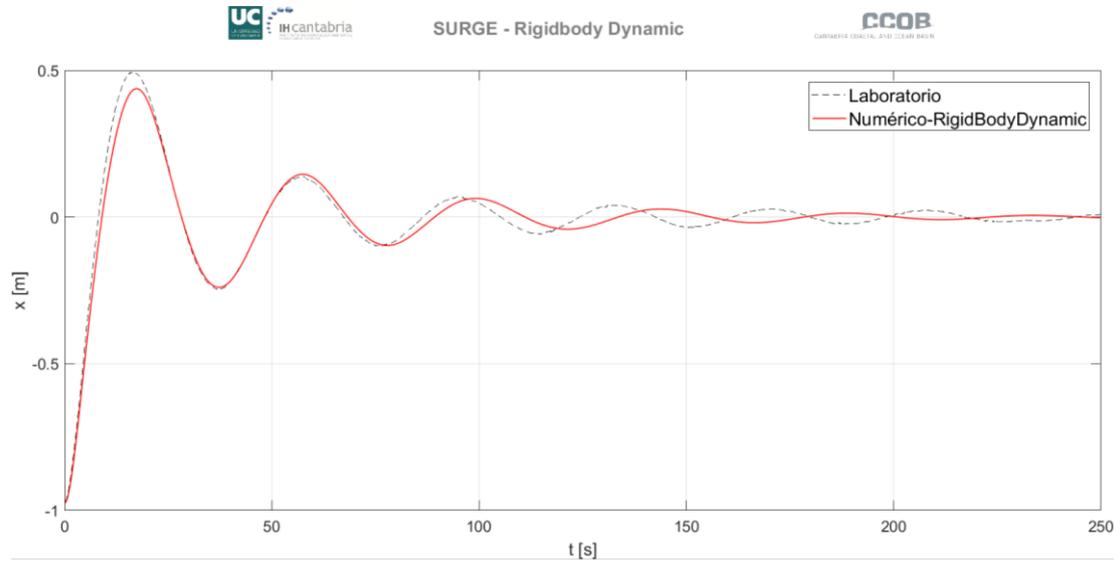


Figura 26: Decay tests para los Gdl Surge, Heave, Pitch y Yaw. Configuración Multicuerpo Dinámico

Rigidbody Dinámico



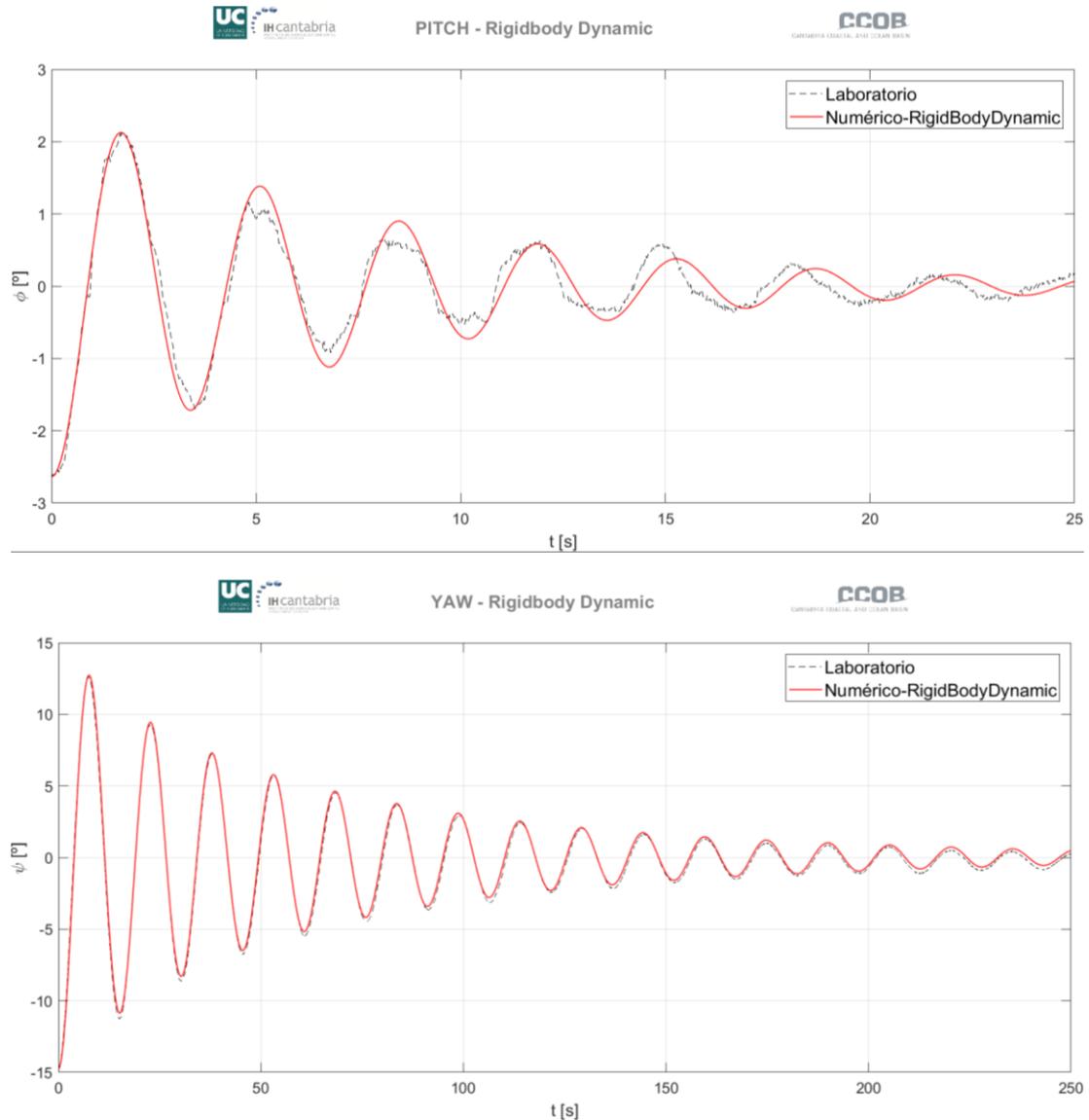
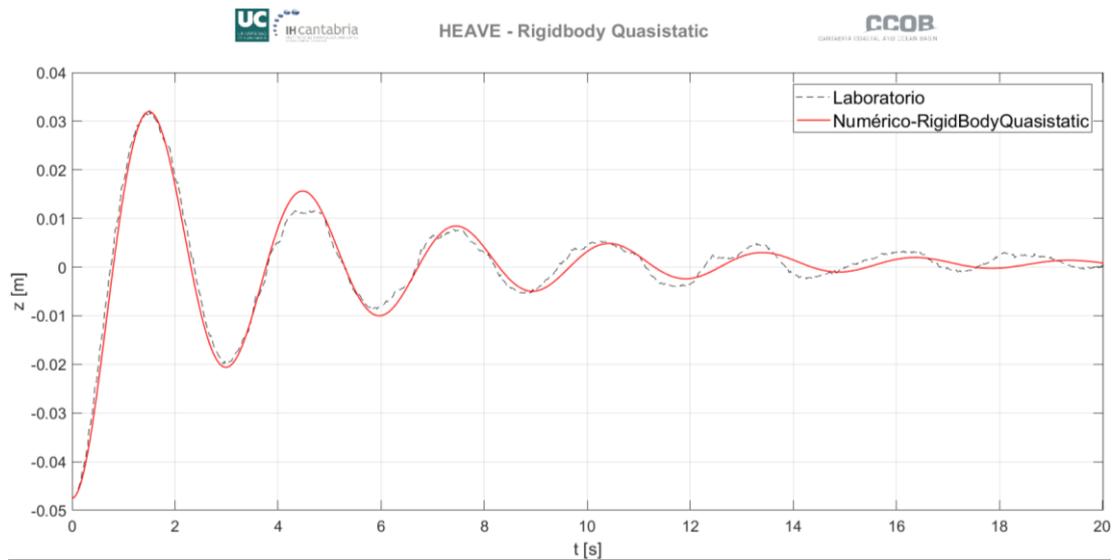
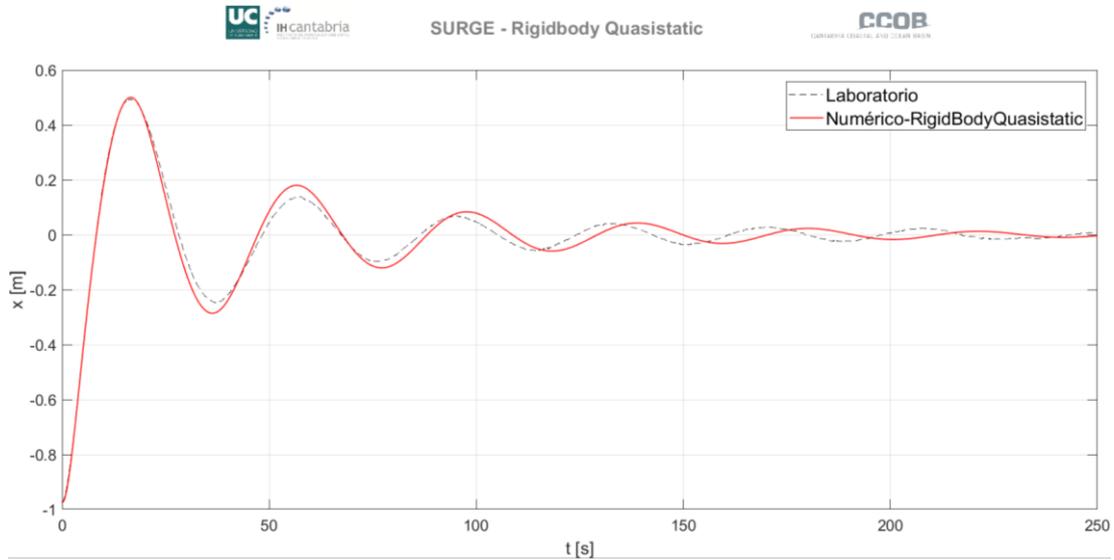


Figura 27: Decay tests para los Gdl Surge, Heave, Pitch y Yaw. Configuración RigidBody Dinámico

Rigidbody Cuasiestático



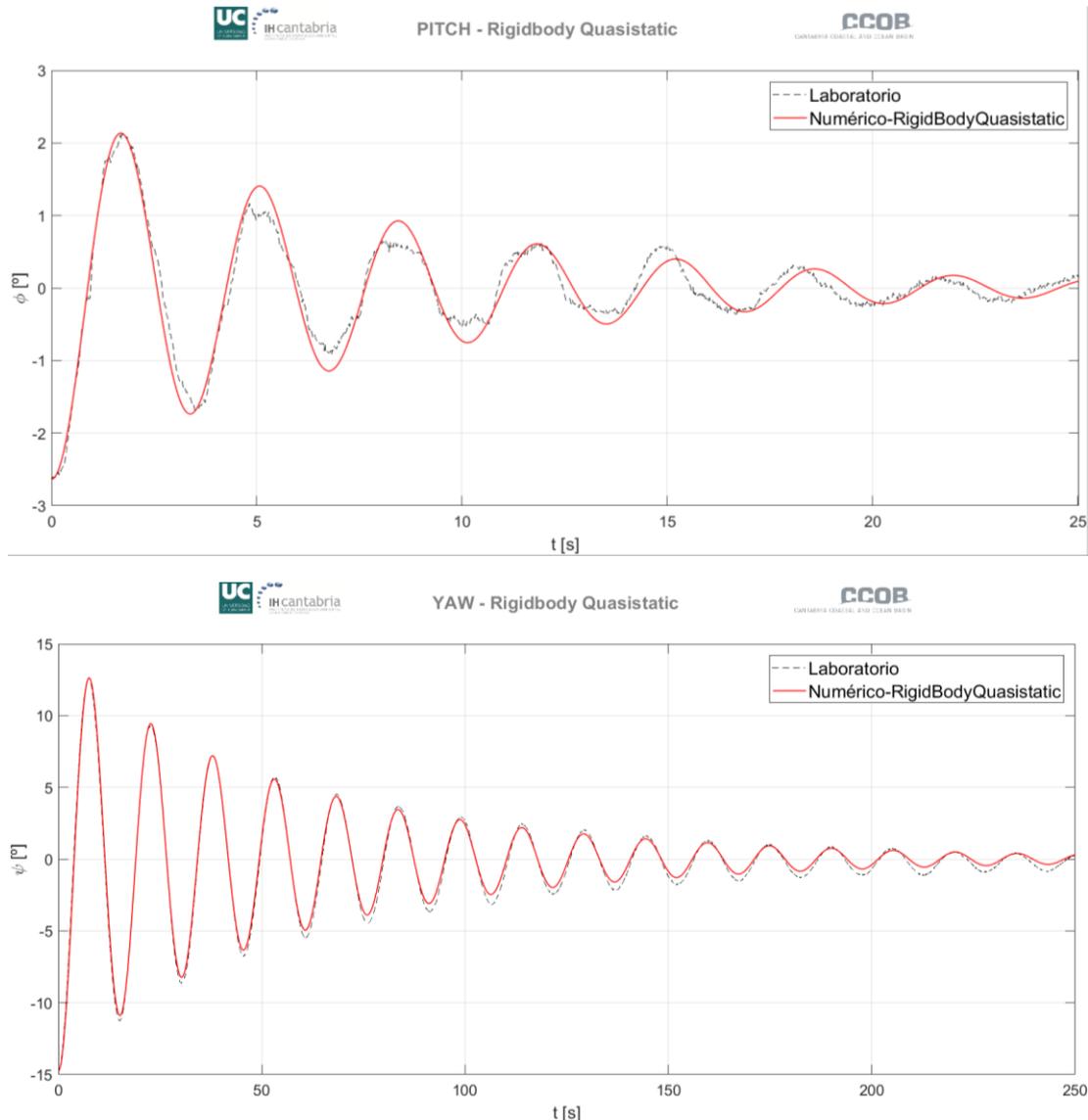


Figura 28: Decay tests para los Gdl Surge, Heave, Pitch y Yaw. Configuración RigidBody Cuasiestático

En general se consigue una estimación muy buena del movimiento de la plataforma. Se puede ver en las tres configuraciones como en los últimos instantes de la simulación, en los GdL surge y heave, se desajusta un poco el periodo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en esos instantes, se están produciendo movimientos del orden de 10^{-3} m, y puede que el sistema de captura de movimiento de la plataforma no esté captando con suficiente precisión el comportamiento real de la misma en laboratorio. Por esta razón, se da por buena la calibración y se aceptan los coeficientes obtenidos, que serán recalibrados posteriormente con los oleajes regulares en caso de ser necesario.

Estos coeficientes son:

	Multicuerpo Dinámico			Sólido Rígido Dinámico			Sólido Rígido Cuasiestático		
	A^∞	kl	knl	A^∞	kl	knl	A^∞	kl	knl
Surge	3,40	10,00	75,00	2,85	13,00	290,00	2,85	13,00	290,00
Sway	3,40	10,00	75,00	2,85	13,00	290,00	2,85	13,00	290,00
Heave	1,90	67,25	57,65	1,80	100,00	700,00	1,80	100,00	700,00
Roll	1,80	3,46	4,03	1,60	6,60	0,00	1,60	6,60	0,00
Pitch	1,80	3,46	4,03	1,60	6,60	0,00	1,60	6,60	0,00
Yaw	-4,40	0,14	0,00	-3,00	0,07	4,00	-3,00	0,07	4,00

Tabla 10: Coeficientes de masa añadida y amortiguamiento para cada GdL de las tres configuraciones

A continuación, se presentan unas figuras que incluyen, para cada GdL, las tres configuraciones simultáneamente.

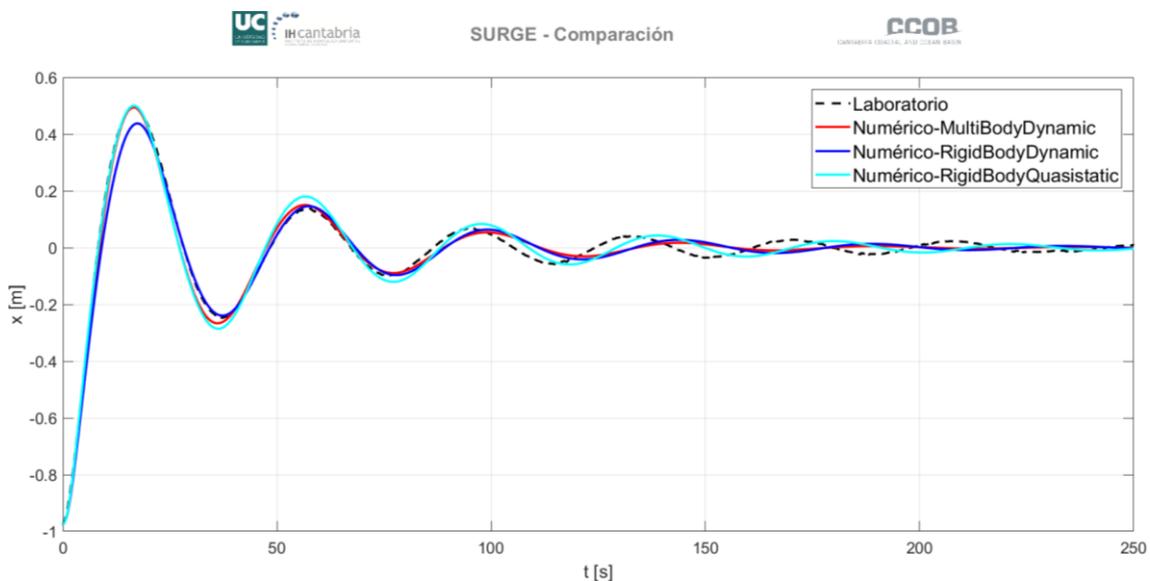


Figura 29: Comparación decay test del GdL Surge. Todas las configuraciones

En el caso del GdL surge las tres simulaciones resultan muy parecidas. Los dos modelos que usan dinámico, tanto multicuerpo como rigidbody, se superponen a lo largo de toda la simulación. El modelo cuasiestático se desfasa un poco al final, cuando la estructura ya está recuperando su posición de equilibrio. Es lógico que haya una diferencia entre dinámico y cuasiestático en surge, ya que, al resolver las posiciones de las catenarias de distinta manera, las tensiones pueden variar en cierta medida y afectar directamente a dicho grado de libertad. En los primeros segundos, las fuerzas son de mayor intensidad y los modelos se comportan de una forma más parecida, siendo las tres simulaciones similares.

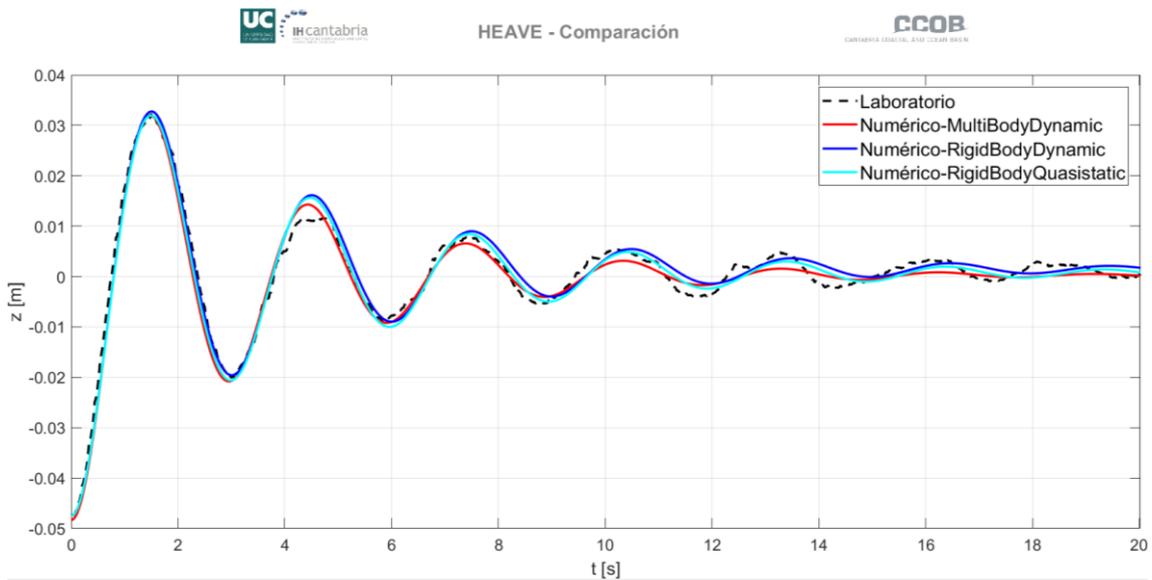


Figura 30: Comparación decay test del GdL Heave. Todas las configuraciones

El GdL heave queda bien representado por cualquiera de las tres configuraciones. Hay una pequeña variación de amplitud entre multicuerpo y rigidbody, pero es del orden de magnitud de 10^{-3} m, por lo que se puede considerar despreciable.

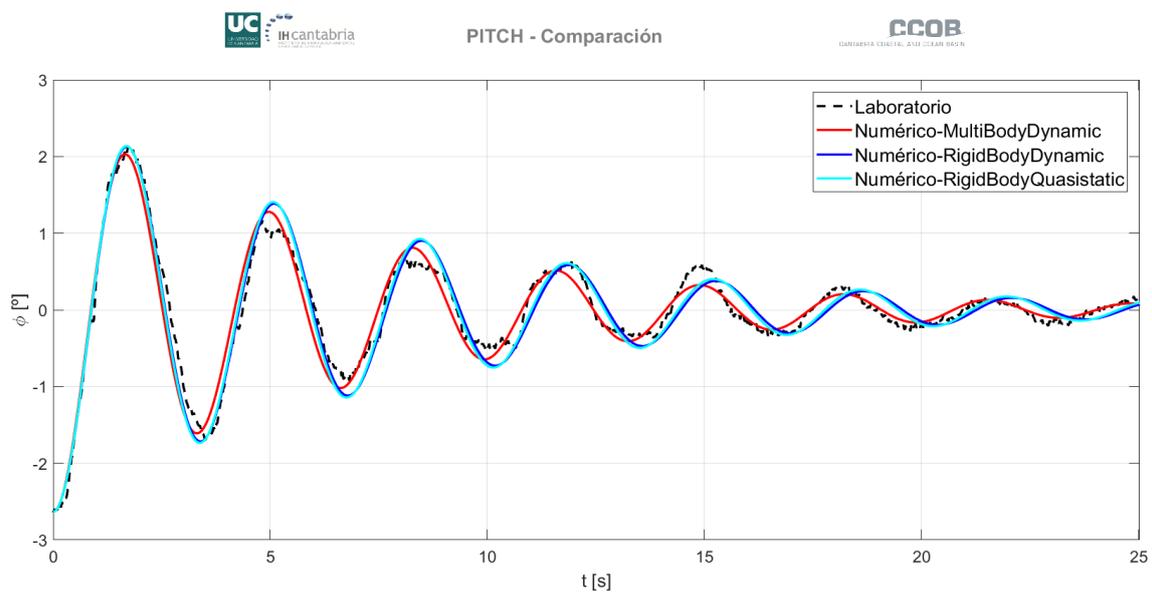


Figura 31: Comparación decay test del GdL Pitch. Todas las configuraciones

En el GdL pitch, las amplitudes de las oscilaciones son prácticamente iguales tanto en multicuerpo como en rigidbody. Hay un pequeño desfase entre dinámico y cuasiestático que, como se comentó para surge, puede ser debido a la diferente resolución del sistema de fondeo, ya que se va desfasando con el tiempo. En este caso, como es lógico, el orden de magnitud del desfase es mucho menor, menos de 1 segundo, ya que el sistema de fondeo afecta más al GdL surge que al GdL pitch, que está más condicionado por la rigidez natural del sistema jaula y sinker

en ese grado de libertad y el efecto de la placa de amortiguamiento (que principalmente es para heave, pero aporta cierto amortiguamiento en pitch y roll).

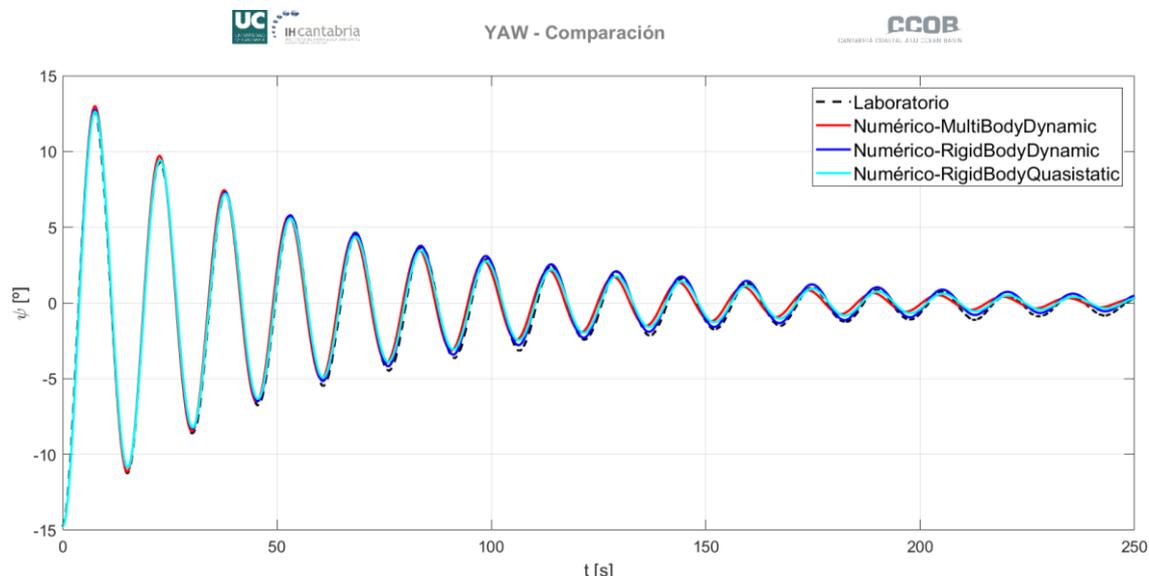


Figura 32: Comparación decay test del Gdl Yaw. Todas las configuraciones

En el caso del GdL yaw, el comportamiento de la estructura queda perfectamente representado por las tres simulaciones, que coinciden tanto en amplitud como en periodo.

5.3.4. Calibración y validación de oleajes regulares

En esta etapa se comparan las series de oleaje regular obtenidas en laboratorio con las calculadas por el modelo numérico, con el objetivo de poder ajustar mejor el comportamiento de la estructura a la realidad.

En principio, los coeficientes obtenidos en los decays serían los valores definitivos y las series temporales del modelo numérico deberían representar los movimientos producidos en laboratorio. Sin embargo, dado el amplio rango de posibles combinaciones de valores de los coeficientes de amortiguamiento, los valores obtenidos en los decays no son los definitivos y se procederá a realizar un segundo ajuste más preciso mediante las series de oleaje regular.

5.3.4.1. Metodología

Para la calibración de los oleajes regulares, se han empleado las RAOs (Response Amplitude Operator, conocido como operador de respuesta en amplitud) de cada GdL de distintos estados de mar. Se han comparado las RAOs obtenidas en laboratorio con las RAOs calculadas a partir de los resultados de las simulaciones. Para conseguir una mejor calibración se ha calculado el error relativo de cada una de las simulaciones realizadas. Estas simulaciones barrían un rango de valores de los diferentes coeficientes de amortiguamiento próximos al valor obtenido en los decays y, el valor definitivo sería aquel cuyo error relativo fuese menor.

En la siguiente la Figura 33 se puede ver como se han obtenido los valores definitivos a través de una tabla Excel.

C01 - Oleaje Regular (H = 1,5m)							
CASO	Periodos	NUMÉRICO		LABORATORIO		ERROR RELATIVO (%)	
		Heave	Pitch	Heave	Pitch	Heave	Pitch
0	5,5	0,1667	0,7742	0,1517	1,1358	-9,89	31,84
	7	0,4002	1,7158	0,4952	1,8609	19,18	7,80
	9	0,1424	1,6362	0,1114	1,6695	-27,83	1,99
	11	0,2540	1,4266	0,3266	1,1972	22,23	-19,16
	13	0,1164	0,8906	0,4489	0,8948	74,07	0,47
	15	0,9139	0,7020	1,1474	0,6738	20,35	-4,19
	17	1,2419	0,5925	1,2357	0,8207	-0,50	27,81
	19	1,1834	0,5083	0,7901	2,8266	-49,78	82,02
ERROR MEDIO PONDERADO (%)						24,86	13,32

Figura 33: Ejemplo de un caso de calibración de coeficientes de amortiguamiento en Excel

Sólo se han recalibrado los coeficientes de amortiguamiento de los GdL heave y pitch porque en el resto de GdL la diferencia al variar sus respectivos coeficientes era mínima.

A continuación, en la Figura 34 se muestra un ejemplo de una gráfica de RAOs calibrada. En este caso se ha elegido el oleaje regular C01, cuya altura de ola es de 1.5m y la simulación de sólido rígido cuasiestático.

TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C01: H = 1.5m (INC)

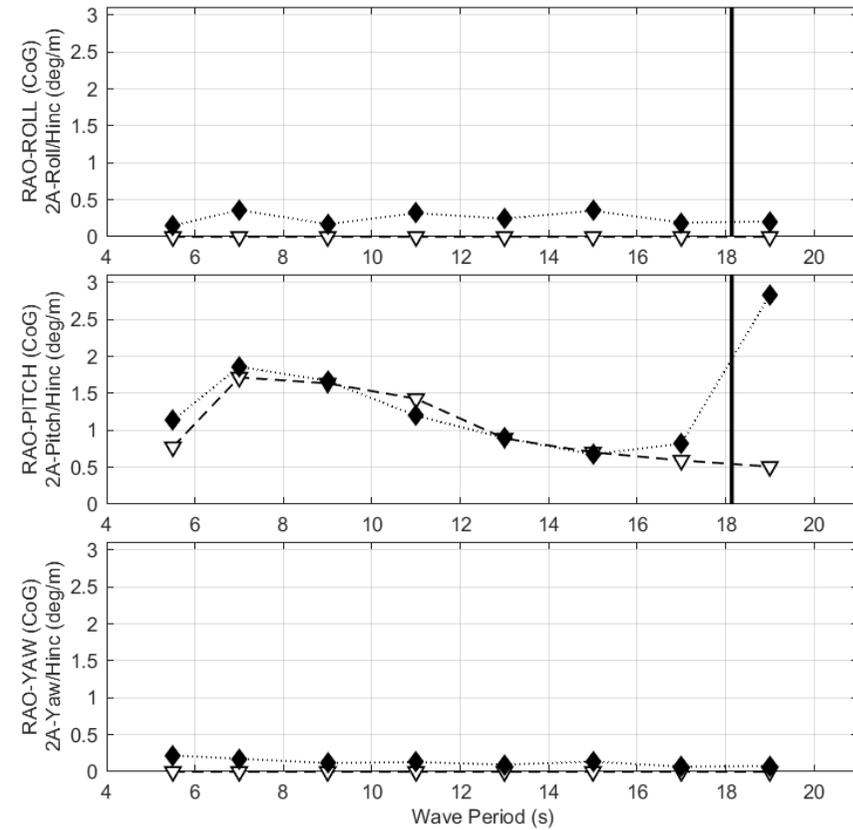
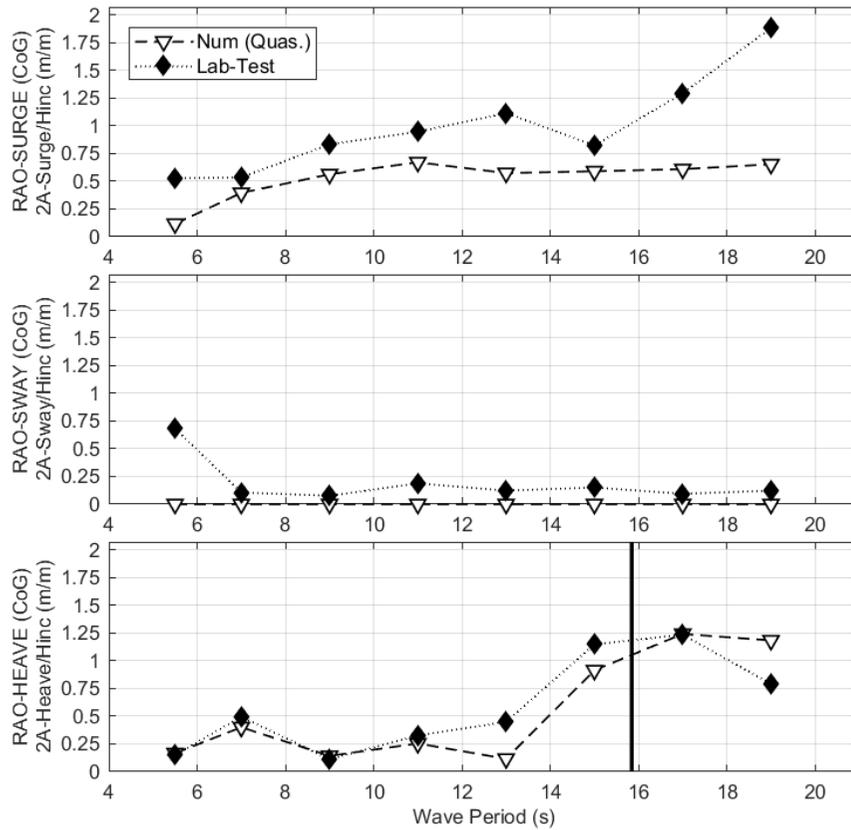


Figura 34: RAOs modelo número vs laboratorio. Configuración de oleaje C01. Sólido Rígido Cuasiestático

En estas gráficas se representa el periodo del oleaje en el eje de abscisas y las RAOs en el eje de ordenadas. El periodo viene definido en segundos mientras que las RAOs son un parámetro adimensional (m/m) ya que es el resultado de dividir la amplitud del movimiento de respuesta de la estructura entre la amplitud del oleaje incidente, dando lugar a este parámetro adimensional que permite comparar el resultado del modelo numérico con los datos de laboratorio de forma directa. Además, en las gráficas de heave, roll y pitch viene definido por una recta vertical el periodo propio de oscilación de la estructura de esos GdL (obtenida en los ensayos de extinción en el laboratorio).

Una vez calibradas las RAOs, se validarán las series temporales de oleaje y se comprobarán las tensiones tanto en el sistema de fondeo como en los tendones.

5.3.4.2. Resultados

En las siguientes figuras se representan las RAOs de las tres configuraciones de oleaje regular. Se muestran en una misma gráfica las RAOs del modelo multicuerpo y las RAOs del modelo de sólido rígido, tanto cuasiestático como dinámico.

TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C01: H = 1.5m (INC)

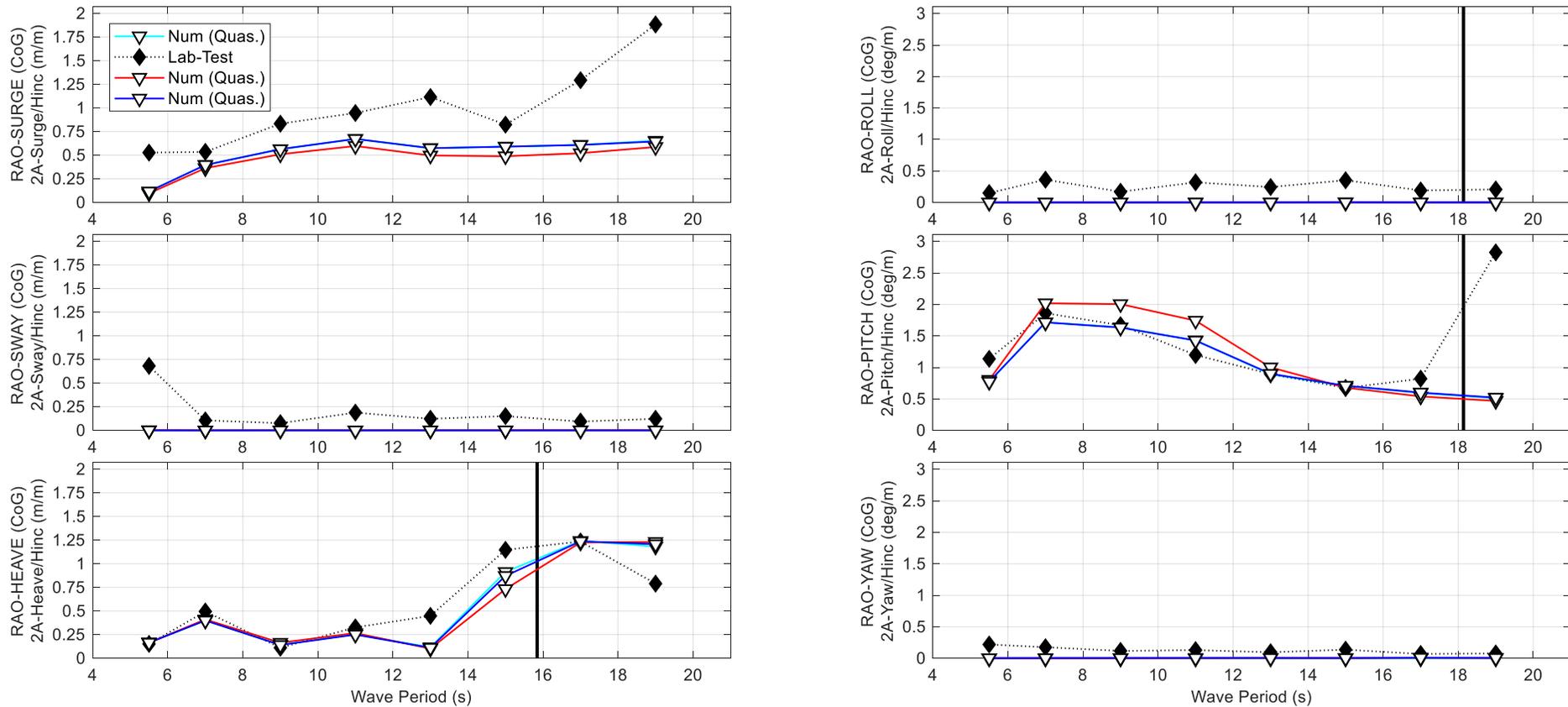


Figura 35: RAOs de sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C01

TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C02: H = 3.0m (INC)

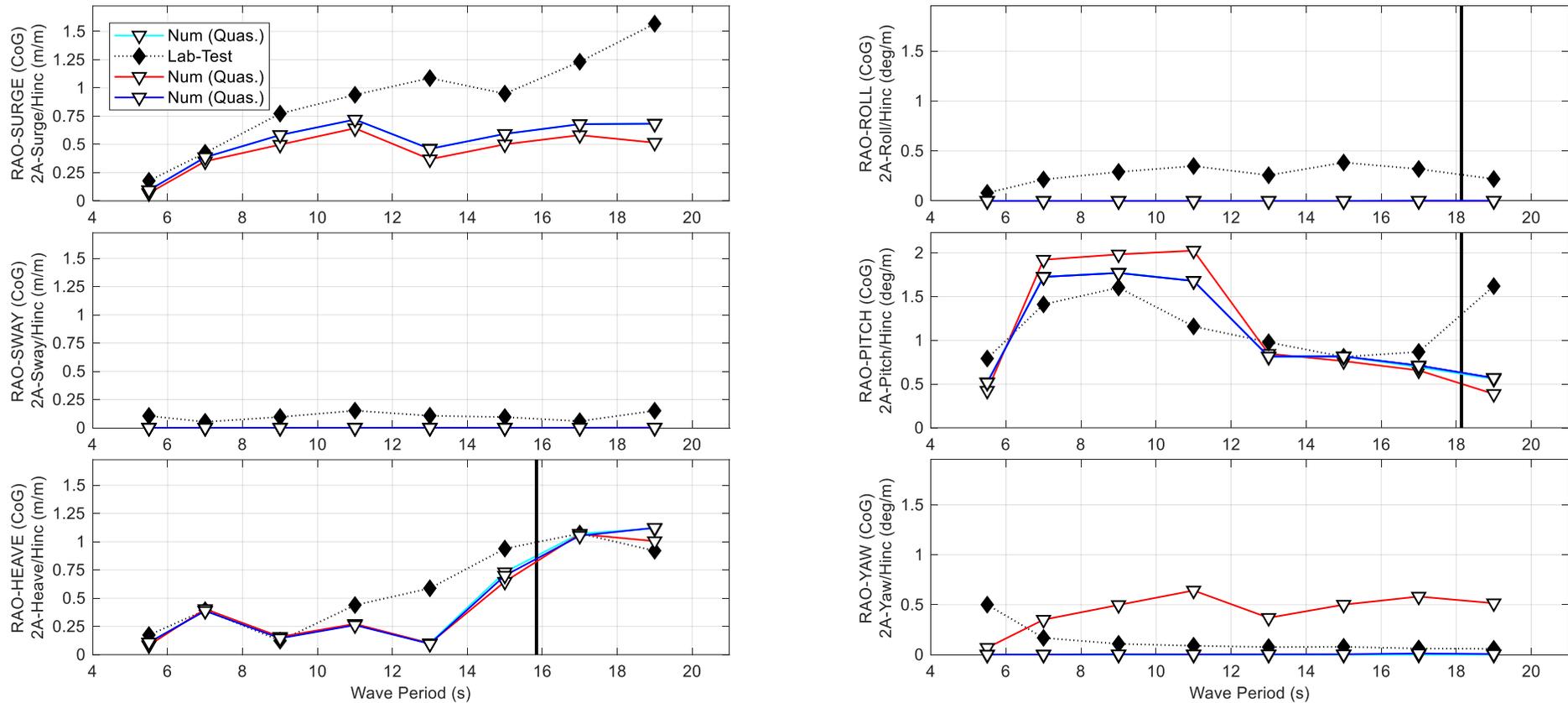


Figura 36: RAOs de sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C02

TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C03: H = 5.0m (INC)

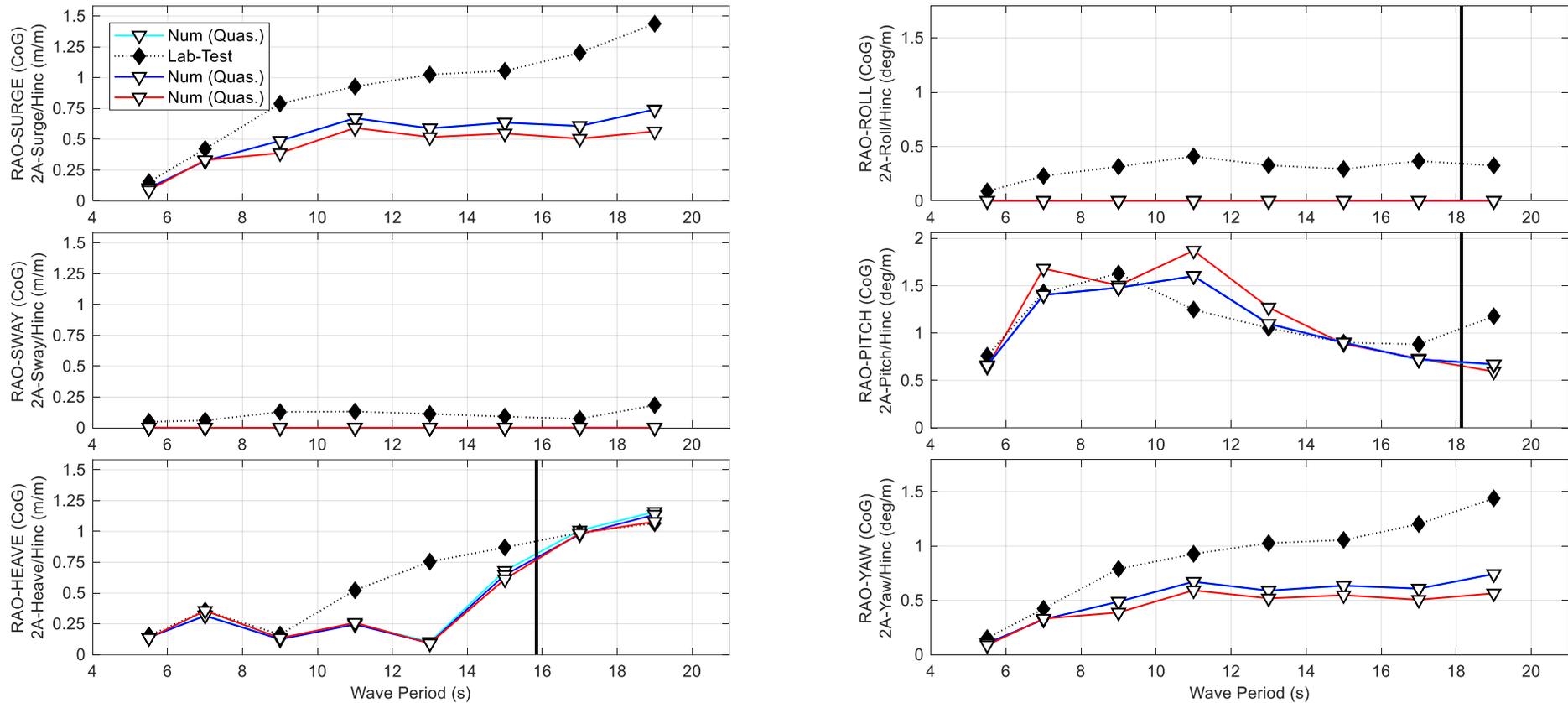


Figura 37: RAOs de sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C03

Como se puede ver en estas tres figuras, en general se consigue una buena aproximación a los datos de laboratorio. Los dos modelos de sólido rígido, cuasiestático y dinámico, se superponen prácticamente en todos los casos. El multicuerpo difiere un poco de estos dos, debido a que al tener un mayor coste computacional no se ha podido ajustar tanto la calibración como en los otros dos modelos. Sin embargo, se puede ver como tiene, en todos los casos, la misma tendencia que los modelos de sólido rígido. Posteriormente, con las series temporales se justificarán un poco más en detalle algunas irregularidades como la falta de precisión en el periodo 13 para el GdL pitch, etc.

Dada la singularidad de la estructura, ha sido necesario usar distintos coeficientes de amortiguamiento en las tres configuraciones C01, C02 y C03; a diferencia de otros modelos en los que son únicos para cualquier estado de mar. Como se puede observar, cuanto mayor es la altura de ola menores son los coeficientes de amortiguamiento, puesto que la amplitud de los movimientos de la estructura es mayor y, por tanto, hay que permitir al modelo numérico que alcance estos valores, es decir, restringir menos el amortiguamiento. Por esta razón se han obtenido tres configuraciones diferentes de los coeficientes de amortiguamiento, una por cada altura de ola.

Estos coeficientes son:

C01						
	Multicuerpo Dinámico		Sólido Rígido Dinámico		Sólido Rígido Cuasiestático	
	kl	knl	kl	knl	kl	knl
Surge	10,00	75,00	13,00	290,00	13,00	290,00
Sway	10,00	75,00	13,00	290,00	13,00	290,00
Heave	0,00	850,00	0,00	1.800,00	0,00	1.800,00
Roll	50,00	0,00	53,00	0,00	53,00	0,00
Pitch	50,00	0,00	53,00	0,00	53,00	0,00
Yaw	0,14	0,00	0,07	4,00	0,07	4,00

Tabla 11: Coeficientes de amortiguamiento kl y knl para sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C01

C02						
	Multicuerpo Dinámico		Sólido Rígido Dinámico		Sólido Rígido Cuasiestático	
	kl	knl	kl	knl	kl	knl
Surge	10,00	75,00	13,00	290,00	13,00	290,00
Sway	10,00	75,00	13,00	290,00	13,00	290,00
Heave	0,00	650,00	0,00	1.500,00	0,00	1.500,00
Roll	42,00	0,00	44,00	0,00	44,00	0,00
Pitch	42,00	0,00	44,00	0,00	44,00	0,00
Yaw	0,14	0,00	0,07	4,00	0,07	4,00

Tabla 12: Coeficientes de amortiguamiento kl y knl para sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C02

C03						
	Multicuerpo Dinámico		Sólido Rígido Dinámico		Sólido Rígido Cuasiestático	
	kl	knl	kl	knl	kl	knl
Surge	10,00	75,00	13,00	290,00	13,00	290,00
Sway	10,00	75,00	13,00	290,00	13,00	290,00
Heave	0,00	550,00	0,00	1.150,00	0,00	1.150,00
Roll	39,00	0,00	42,00	0,00	42,00	0,00
Pitch	39,00	0,00	42,00	0,00	42,00	0,00
Yaw	0,14	0,00	0,07	4,00	0,07	4,00

Tabla 13: Coeficientes de amortiguamiento kl y knl para sólido rígido cuasiestático, sólido rígido dinámico y multicuerpo dinámico. Configuración de oleaje C03

A continuación, se muestran las series temporales de oleaje de los casos más interesantes. El resto de estados de mar se pueden consultar en el anexo de resultados.

Puesto que se obtienen resultados muy parecidos tanto para sólido rígido como para multicuerpo se van a describir los casos más representativos del modelo de sólido rígido cuasiestático. Además, en las tres configuraciones de oleaje regular se obtienen resultados similares, diferenciándose en amplitud, por lo que se describirá únicamente una de ellas, en este caso se ha escogido la configuración C01.

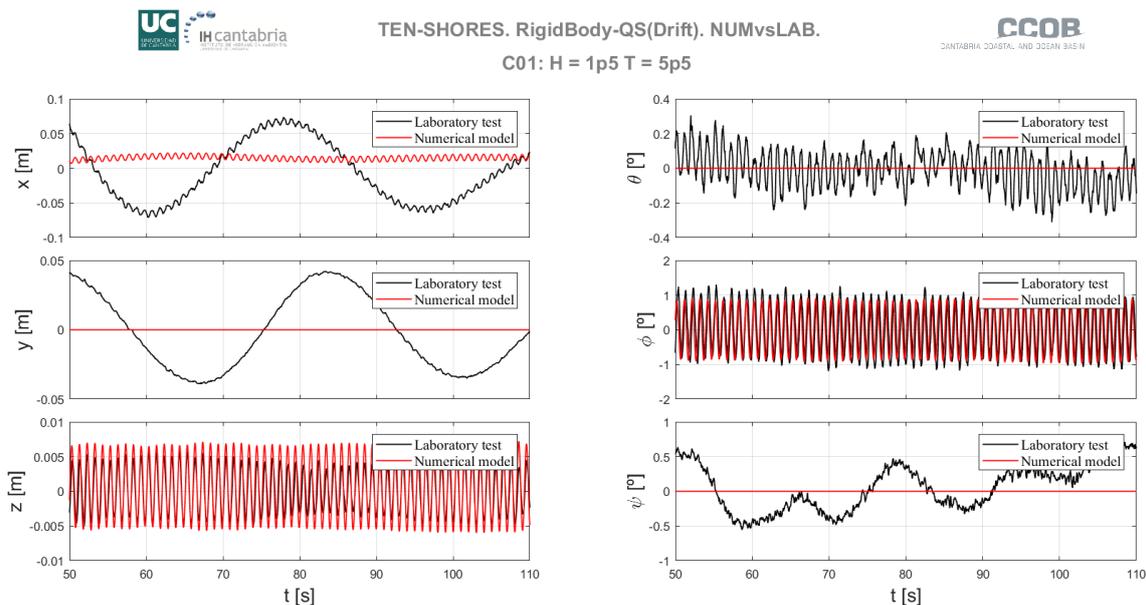


Figura 38: Serie temporal de oleaje de todos los GdL. Configuración C01, T 5.5. Sólido rígido cuasiestático

Como se muestra en la Figura 38, en los GdL sway, roll y yaw no se aprecia movimiento en la serie del modelo numérico. En realidad sí hay movimiento, pero las amplitudes son muy pequeñas, tendiendo a cero. Esto es debido a que la estructura, doblemente simétrica, está recibiendo un oleaje incidente en la dirección surge, por lo que estos tres GdL son los menos afectados por el oleaje. Los movimientos registrados en laboratorio se pueden considerar “ruido” ya que el sistema de captura de movimiento puede ser impreciso a la hora de registrar movimientos tan pequeños. Por esta razón, a partir de ahora solo se mostrarán los GdL surge, heave y pitch.

Así como los GdL heave y pitch están muy bien ajustados, en el GdL surge la amplitud coincide, pero no se consigue ajustar la serie del modelo numérico a los resultados de laboratorio. Esto puede ser debido a dos motivos: puede ser que en laboratorio no se haya partido del equilibrio y que la estructura no estuviera en reposo cuando comenzó el ensayo, esto justificaría por qué se produce ese transitorio en las primeras oscilaciones que se va estabilizando con el tiempo. Sin embargo, puesto que en el resto de configuraciones también ocurre lo mismo para periodos bajos, lo más probable es que no se hayan ajustado bien las fuerzas de deriva (drift) en el modelo numérico. Las fuerzas de drift son unas fuerzas de segundo orden provocadas por los trenes de olas que producen un desplazamiento neto de la estructura provocando que la posición de equilibrio, alrededor de la que oscila el cuerpo cuando está sometido a oleaje, sea diferente a la de reposo. Parece que el transitorio se produce en lo que va desde la posición de equilibrio en reposo a la posición de equilibrio bajo el oleaje. Este efecto es más pronunciado en el laboratorio que en los resultados del modelo numérico. Este aspecto de mejora detectado para esta estructura singular se estudiará en futuras investigaciones con la idea de solventarlo.

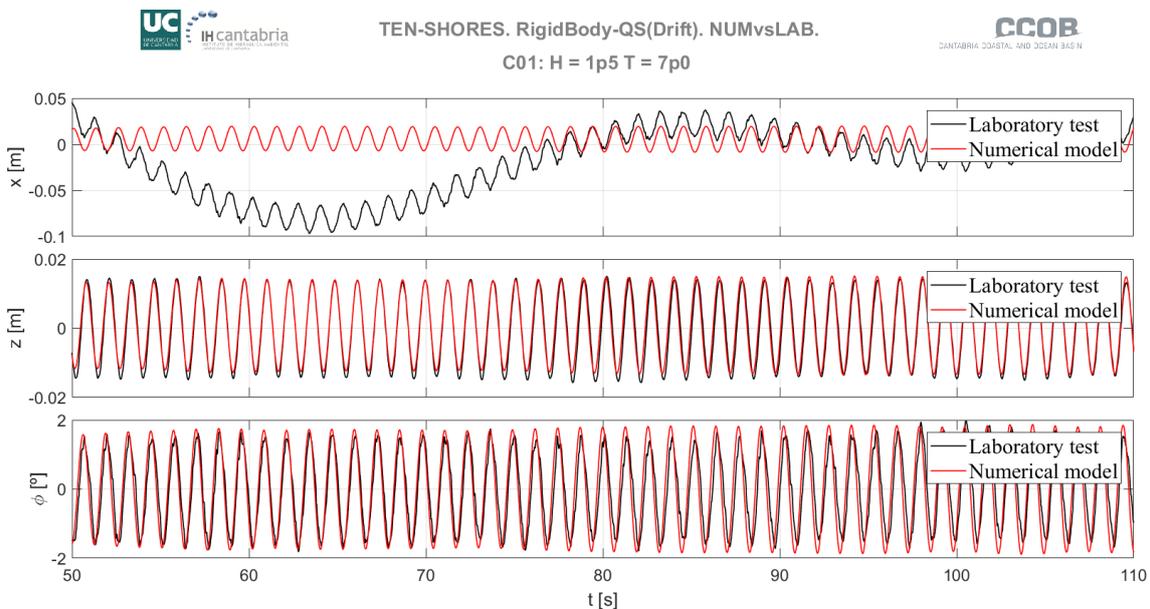


Figura 39: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C01, T 7. Sólido rígido cuasiestático

En la Figura 39 se puede ver mejor como los GdL heave y pitch se ajustan muy bien a los datos de laboratorio mientras que el GdL surge encaja la amplitud, pero no el transitorio inicial.

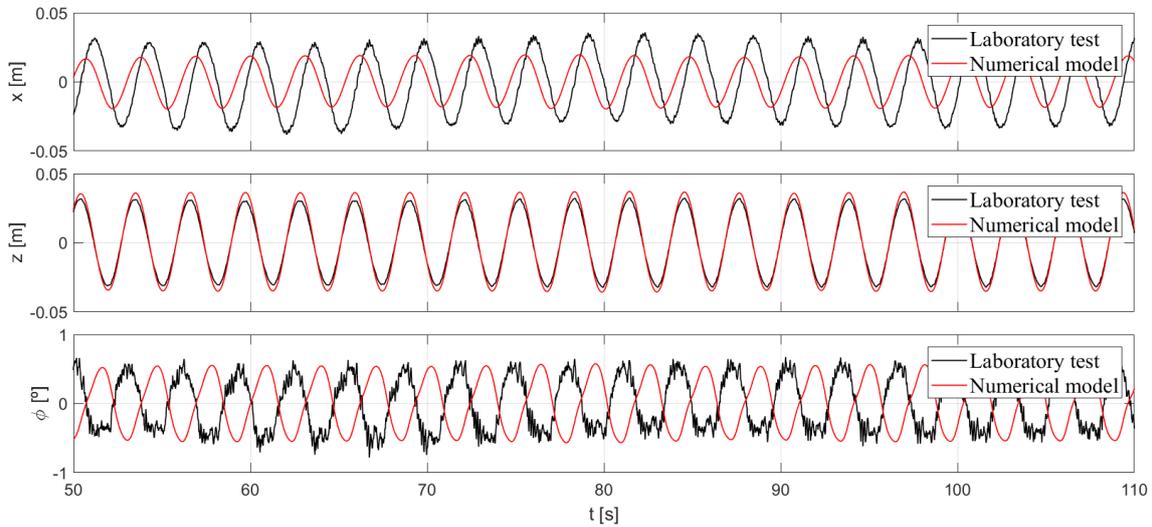


Figura 40: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C01, T 17. Sólido rígido cuasiestático

La Figura 40 muestra que para periodos altos la fuerza de drift se ajusta mejor, ya que la estructura sigue al oleaje en estos casos y no se ve empujada por el mismo. Sin embargo, se produce un desfase de los GdL surge y pitch, más pronunciado en este último, con respecto al GdL heave. Este efecto puede producirse por dos motivos: por un lado puede deberse a la reflexión del oleaje dentro del tanque de ensayos, que es mucho mayor cuando los periodos del oleaje son más altos, lo que afectaría a los GdL surge y pitch “frenando” la acción del oleaje, mientras que en el GdL heave las componentes del oleaje incidente y reflejado se sumarían y no se produciría desfase; o, por otro lado, puede deberse al efecto “moon-pool” que se produce por la masa de agua que hay en el cilindro interior de la estructura. Este efecto hace que la masa de agua dentro de la estructura se mueva de manera diferente al agua exterior, produciendo unas fuerzas en las paredes interiores de la estructura que no son iguales a las que produciría un oleaje impactando sobre ellas directamente. No se tiene mucho conocimiento sobre cómo afecta este fenómeno y, por tanto, puede que no se haya representado bien en el modelo numérico. Este fenómeno se estudiará en futuras investigaciones.

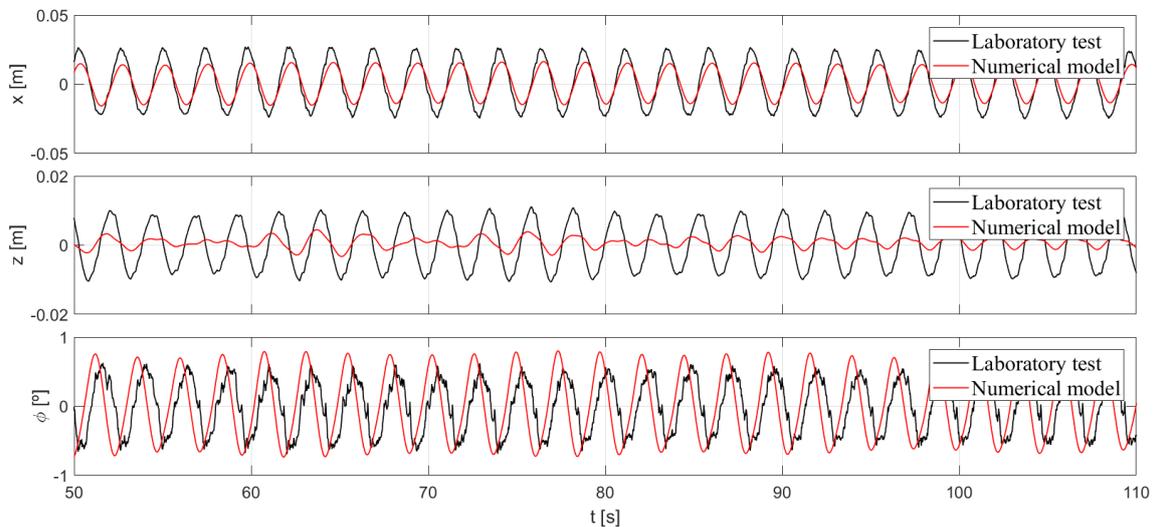


Figura 41: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C01, T 13. Sólido rígido cuasiestático

Por último, cabe destacar la Figura 41 en la que la amplitud del GdL heave no se ajusta a la amplitud de laboratorio. Esto ocurre en todos los periodos de 13 segundos. Puesto que es el único caso en el que no se encaja la amplitud, ya que en el resto de simulaciones la amplitud está bien calibrada, es posible que haya habido un error a la hora de introducir la fuerza de excitación correspondiente a este periodo en NemoH.

Por lo general, la calibración ha sido buena, salvo los casos presentados en este apartado, la mayoría debidos a fenómenos derivados de la singularidad de la estructura que son difíciles de representar por un modelo basado en teoría potencial.

A continuación, se muestra una tabla con las tensiones medias en las catenarias de cada estado de mar por cada modelo, multicuerpo y sólido rígido tanto cuasiestático como dinámico.

Tenshores		
Tensiones en el sistema de fondeo (Escala laboratorio)		
	Laboratorio	Modelo numérico
C01		
Media Cat1 (N):	4,444	4,651
Media Cat2 (N):	4,050	4,627
Media Cat3 (N):	4,542	4,627
Media Cat4 (N):	4,499	4,651
C02		
Media Cat1 (N):	4,214	4,675
Media Cat2 (N):	3,949	4,608
Media Cat3 (N):	3,893	4,608
Media Cat4 (N):	4,218	4,675
C03		
Media Cat1 (N):	4,176	4,727
Media Cat2 (N):	4,212	4,570
Media Cat3 (N):	3,568	4,570
Media Cat4 (N):	3,751	4,727

Tabla 14: Tensiones en el sistema de fondeo (N). Oleaje regular

Las tensiones en el sistema de fondeo del modelo numérico se ajustan perfectamente a las tensiones registradas durante los ensayos de laboratorio.

5.3.5. Validación de oleajes irregulares

En esta etapa se comparan las series de oleaje irregular obtenidas en laboratorio con las calculadas por el modelo numérico, con el objetivo de que el modelo numérico se ajuste a los datos obtenidos en laboratorio sin necesidad de calibrar ningún parámetro.

5.3.5.1. Metodología

Con los parámetros calibrados anteriormente, se usarán los coeficientes de amortiguamiento obtenidos en la configuración C03 ya que la altura de ola es de 3m se aproxima más a las de los estados de mar de los oleajes irregulares y se obtendrán las series temporales de los GdL.

5.3.5.2. Resultados

Al igual que en el apartado anterior, se van a describir los casos más representativos del modelo de sólido rígido cuasiestático.

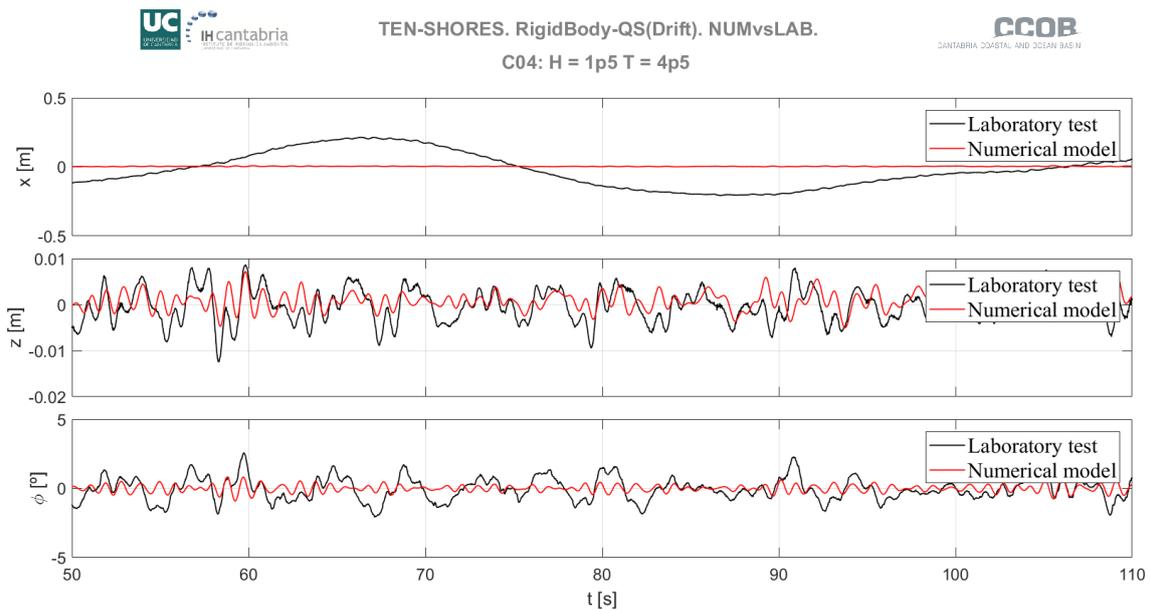


Figura 42: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C04, H 1.5, T 4.5. Sólido rígido cuasiestático

La Figura 42 es la simulación que menos se aproxima a los datos de laboratorio, el resto de casos están bastante bien ajustados. Se puede ver como en el GdL surge ocurre lo mismo que en los casos de oleaje regular para periodos cortos, se ajusta la amplitud pero no el transitorio inicial. En la Figura 43 se aprecia mejor cómo la amplitud en el GdL surge está perfectamente calibrada.

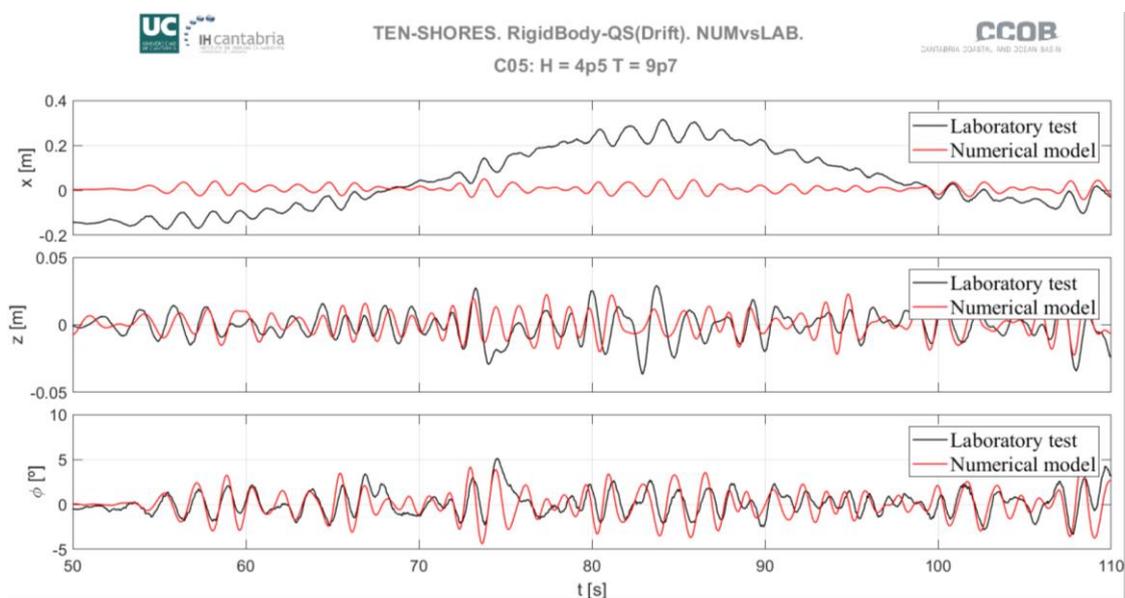


Figura 43: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C05, H 4.5, T 9.7. Sólido rígido cuasiestático

A continuación, en las Figura 44 y Figura 45 se pueden ver dos ejemplos bien calibrados, en los que se consigue representar el movimiento de la estructura producido por un oleaje irregular con bastante exactitud. Cabe mencionar el desfase producido en la Figura 45 en el GdL pitch

pero, como se comentó anteriormente para periodos altos, puede ser debido a la reflexión del tanque, en cuyo caso el modelo numérico se ajustaría bien la realidad.

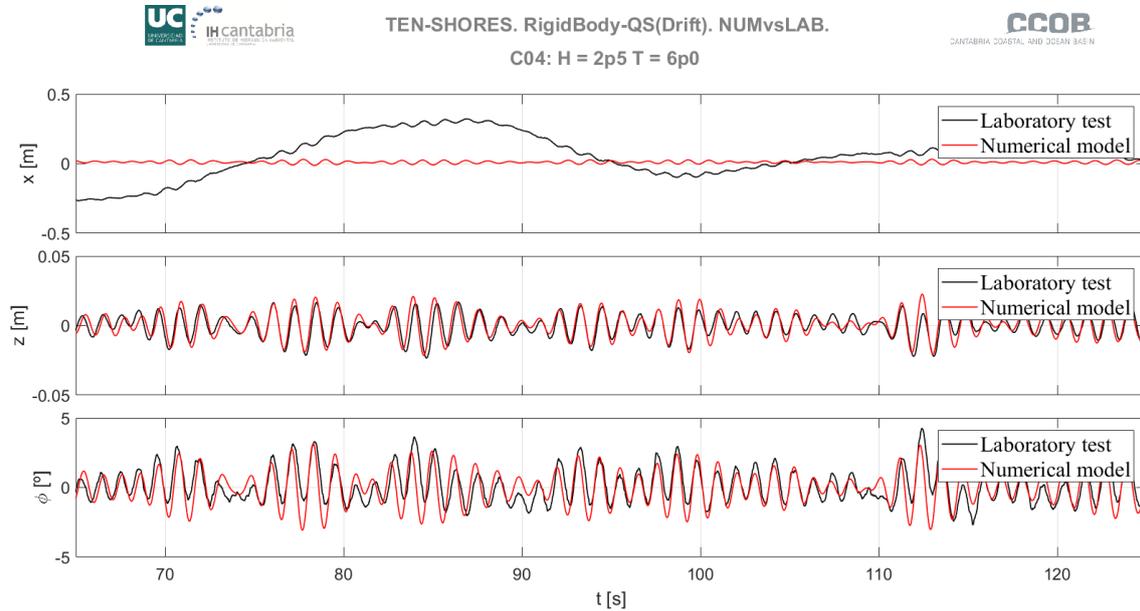


Figura 44: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C04, H 2.5, T 6. Sólido rígido cuasiestático

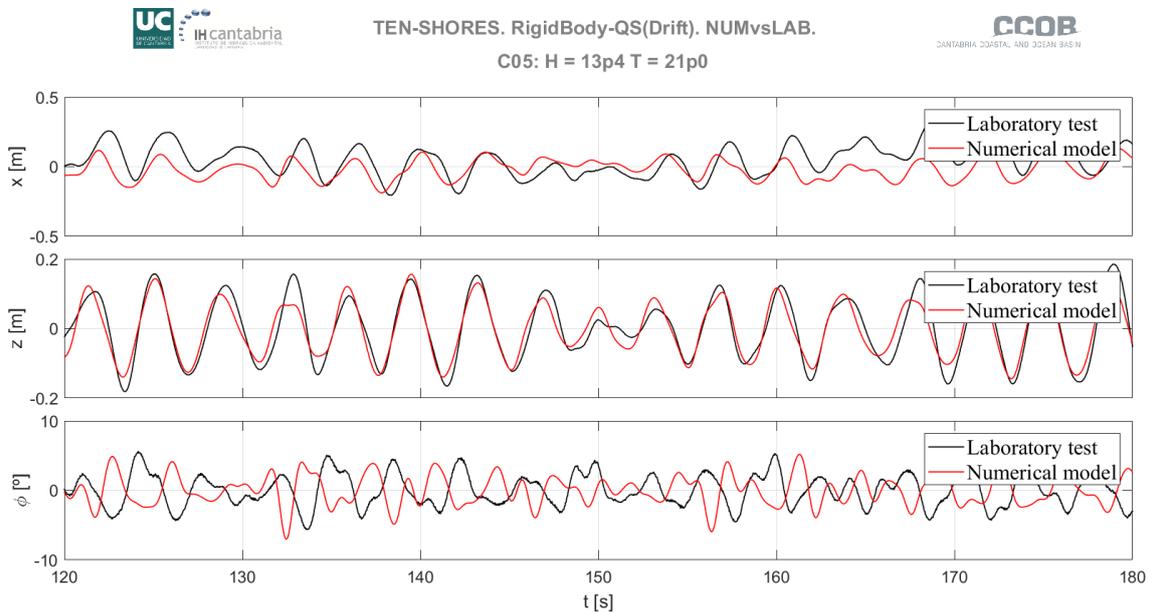


Figura 45: Serie temporal de oleaje de los GdL surge, heave y pitch. Configuración C04, H 13.4, T 21. Sólido rígido cuasiestático

Como se comentó anteriormente, todos los resultados están recogidos en el anejo de resultados.

A continuación, se muestra una tabla con las tensiones medias en las catenarias de cada estado de mar por cada modelo, multicuerpo y sólido rígido tanto cuasiestático como dinámico.

Tenshores		
Tensiones en el sistema de fondeo (Escala laboratorio)		
	Laboratorio	Modelo numérico
C04		
Media Cat1 (N):	4,063	4,664
Media Cat2 (N):	4,155	4,614
Media Cat3 (N):	3,543	4,614
Media Cat4 (N):	3,775	4,664
C05		
Media Cat1 (N):	4,076	4,641
Media Cat2 (N):	4,083	4,667
Media Cat3 (N):	3,714	4,667
Media Cat4 (N):	3,883	4,641

Figura 46: Tensiones en el sistema de fondeo (N). Oleaje irregular

Las tensiones en el sistema de fondeo del modelo numérico se ajustan perfectamente a las tensiones registradas durante los ensayos de laboratorio.

6. CONCLUSIONES

Diseñar una estructura capaz de soportar las condiciones meteoceánicas en mar abierto y a la vez cumplir con su funcionalidad es una tarea que no sería posible sin la experimentación previa de ese modelo a escala laboratorio.

Sin embargo, las campañas de ensayos suponen costes económicos que hacen inviable que se pueda analizar una estructura para todos los posibles estados de mar de todas las posibles localizaciones en las que situarla. Por esta razón, es necesaria una herramienta numérica capaz de predecir el comportamiento de dicha estructura bajo cualquier estado de mar, ahorrando tanto costes económicos como tiempo. Esta herramienta numérica necesita ser calibrada y validada con ciertos ensayos experimentales significativos para comprobar que se ajusta a la realidad.

Por ello, el objetivo principal del presente trabajo fin de máster es la calibración y validación de una herramienta numérica capaz de representar el comportamiento del dispositivo Ten-Shores bajo diferentes condiciones meteoceánicas. Para ello, se ha contado con una base de datos obtenida a partir de la caracterización experimental de la jaula offshore diseñada mediante ensayos bajo diferentes condiciones de oleaje.

El dispositivo Ten-Shores es una estructura flotante de hormigón con un buen comportamiento hidrodinámico capaz de amortiguar los movimientos producidos por el oleaje, viento y corriente. El objetivo de este prototipo de jaula es el cultivo en mar abierto de especies de peces de un alto valor económico, como alternativa a la acuicultura en la costa y a la pesca tradicional, haciendo posible en este caso, aportar una solución ingenieril sostenible al consumo de pescado.

Los ensayos experimentales se han llevado a cabo en el Gran Tanque de Ingeniería Marítima (CCOB) del IHCantabria a escala 1:30, escala limitada por el sistema de fondeo, la profundidad de ensayo y las dimensiones del CCOB.

Los investigadores del IHCantabria del Grupo de Ingeniería Offshore y Energías Marinas han desarrollado un modelo numérico acoplado capaz de analizar movimientos de la estructura bajo el efecto de diferentes condiciones meteoceánicas (oleaje, viento y corriente), y como estas condiciones producen el propio movimiento de la estructura, fuerzas sobre las líneas de fondeo y fuerzas sobre los tendones que soportan el lastre del sinker que da rigidez a la red de contención de especies de peces.

Debido al gran coste computacional que supone resolver un modelo numérico completo, se han realizado ciertas simplificaciones para llegar a una ecuación capaz de simular el comportamiento del dispositivo en el mar en un periodo de tiempo de simulación razonable. Por esta razón, se han empleado unos coeficientes de calibración necesarios para suplir la presencia de efectos importantes que sí estarán presentes en la realidad, como es el caso de la inclusión de unos términos denominados coeficientes de amortiguamiento o damping que tratan de compensar las simplificaciones realizadas. Lo que se pretende conseguir con la introducción de estos coeficientes, cuya calibración previa mediante ensayos de laboratorio es necesaria, es

acercarnos más a lo que pueda ser la realidad física del comportamiento de la estructura multicuerpo.

6.1. Resumen de trabajos realizados

La geometría del dispositivo está formada por dos cuerpos, jaula y sinker (lastre para dar tensión a la red de contención de peces), unidos mediante el sistema de tendones. El coste computacional de la resolución del modelo para la interacción de dos cuerpos que se mueven independientemente es mucho mayor que la de un solo cuerpo. Si a esto se le suma la resolución del modelo dinámico del sistema de fondeo y de tendones, la duración de las simulaciones es mucho mayor. Por este motivo se ha estudiado también el análisis de la estructura como un sólido rígido, es decir; la jaula, el sinker y los tendones forman un único cuerpo. De esta forma se han podido comparar los resultados obtenidos de cada simulación y justificar si se podría o no utilizar un modelo simplificado para representar el comportamiento en el mar de esta estructura en simulaciones preliminares, pudiendo usar el modelo dinámico en las simulaciones en las que sea necesario por requerimiento de diseño o de normativa.

Por tanto, se han realizado estas tres simulaciones durante todo el proceso de calibración:

- **Sólido rígido** con modelo **cuasiestático** (RigidBody-Quasistatic).
- **Sólido rígido** con modelo **dinámico** (RigidBody-Dinamic).
- **Multicuerpo** con modelo **dinámico** (MultiBody – Dynamic).

En primer lugar, se han calibrado los ensayos de extinción, con el objetivo de obtener los valores de los coeficientes de amortiguamiento y masa añadida que mejor ajusten el modelo numérico. En estos ensayos se han obtenido muy buenos resultados, coincidiendo en todo momento tanto las simulaciones de la estructura multicuerpo como las de sólido rígido.

Posteriormente se han recalibrado los coeficientes de amortiguamiento obtenidos en los ensayos de extinción para ajustarse mejor a los oleajes regulares. En esta etapa, debido al mayor coste computacional que requieren las simulaciones de la estructura multicuerpo, ya que la duración de las simulaciones es mucho mayor que las de los ensayos de extinción, los resultados obtenidos para esta configuración no han sido tan buenos como los obtenidos con sólido rígido, es decir, no se han podido realizar tantas iteraciones como con el modelo de sólido rígido. Sin embargo, se puede comprobar cómo se comportan de igual manera a falta de mejorar en cierta medida el ajuste de la amplitud. Dada la singularidad de la estructura, se han obtenido tres combinaciones de coeficientes de amortiguamiento, una por cada configuración de oleaje regular; a diferencia de otros modelos en los que son únicos para cualquier estado de mar.

Por último, se han validado las series de oleaje irregular, en las que se ha conseguido un buen ajuste a pesar de la singularidad ya resaltada de la estructura y las no linealidades presentes en los ensayos de laboratorio.

6.2. Resumen de resultados más relevantes

Por lo general, se ha conseguido una buena aproximación en el modelo numérico a los datos obtenidos en laboratorio. Sin embargo, hay casos concretos en los que el modelo no se ha ajustado como debería a la realidad de los ensayos.

A continuación, se detallan observaciones realizadas de dichos resultados en los que el modelo no ha sido capaz de representar exactamente la realidad:

- Para periodos bajos de oleaje, la amplitud en el GdL surge es coincidente, pero no se consigue representar el transitorio inicial que se produce en laboratorio. Esto puede ser debido a que en laboratorio no se haya partido del equilibrio (poco probable) o, puesto que en el resto de configuraciones también se ha observado lo mismo para periodos bajos, lo más probable es que no se hayan ajustado bien las fuerzas de deriva de segundo orden (drift) en el modelo numérico. Este aspecto de mejora en el modelo numérico detectado para esta estructura singular se estudiará en futuras investigaciones con la idea de solventarlo.
- Para periodos altos de oleaje se produce un desfase de los GdL surge y pitch, siendo más pronunciado en este último, con respecto al GdL heave. Este efecto puede producirse por la reflexión del oleaje dentro del tanque de ensayos, o el efecto “moon-pool” que se produce por la masa de agua que hay en el cilindro interior de la estructura, la cual produce fuerzas que inicialmente no se tuvieron en cuenta para el modelo numérico. Este fenómeno se está estudiando y forma parte de futuras investigaciones por parte de los investigadores del IHCantabria.
- En los casos concretos con oleajes de periodo de 13 segundos la amplitud del GdL heave no se ajusta a la amplitud de laboratorio. Puesto que es el único periodo en el que no se encaja la amplitud, ya que en el resto de simulaciones la amplitud está bien calibrada, es posible que haya habido un error a la hora de introducir la fuerza de excitación correspondiente a este periodo en NemoH.

Por tanto, se puede concluir que la calibración ha sido buena, excepto en los casos mencionados en este apartado, cuyas divergencias en resultados son debidos a fenómenos derivados de la singularidad de la estructura que son difíciles de representar por un modelo basado en teoría potencial y que no se habían contemplado inicialmente.

6.3. Conclusión del trabajo

La conclusión final y más importante obtenida durante la realización de este trabajo fin de máster es la posibilidad de utilizar las herramientas numéricas simplificadas de sólido rígido dinámico y sólido rígido cuasiestático para la validación del dispositivo Ten-Shores.

Concretamente, el modelo sólido rígido cuasiestático ha resultado ser muy eficaz, representando fielmente tanto los movimientos de la jaula como las tensiones en el sistema de fondeo producidos durante los ensayos de laboratorio. Además, su coste computacional es

mínimo, del orden de minutos, frente al coste computacional del modelo sólido rígido dinámico que es del orden de días o el del modelo multicuerpo que es del orden de semanas.

El único problema de este modelo simplificado es que no se pueden obtener las tensiones en el sistema de tendones ni los movimientos del sinker, puesto que están incluido como sólido rígido dentro de un único cuerpo.

A pesar de esto, se recomienda utilizar el modelo de sólido rígido cuasiestático para representar los movimientos de la jaula y las tensiones en el sistema de fondeo mientras se obtienen los resultados del modelo multicuerpo dinámico para obtener el resto de información de interés para el diseño y análisis de operativa del dispositivo offshore.

7. REFERENCIAS

- Armesto, J. A., de los Dolores, D., & Guanche, R. (2016). *El modelado numérico como herramienta en el estudio de energías renovables marinas*. Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria.
- Armesto, J. A., Guanche, R., del Jesus, F., Iturrioz, A., & Losada, I. J. (2015). Comparative analysis of the methods to compute the radiation term in Cummins' equation.
- Faltinsen, O. M. (1993). *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge University Press.
- FAO. (2012). *The State of the World Fisheries and Aquaculture*. Rome: Office of Knowledge Exchange, Research and Extension.
- Guanche García, R., Fuentes, J., Alfonso, Ondiviela Eizaguirre, B., & Juanes de la Peña, J. A. (2016). *España Patente nº ES-2578429_A1*.
- Iturrioz, A., Guanche, R., Armesto, J. A., Alves, M. A., Vidal, C., & Losada, I. J. (2014). Identification of state-space coefficients for oscillating water columns using temporal series.
- Miranda, A. (2011). *Flujos ideales incompresibles*. Recuperado el 2017, de <https://es.slideshare.net/AlexanderMiranda3/flujospotenciales>
- Unión Europea. (2016). *La política pesquera*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.

8. AGRADECIMIENTOS

Por último, quiero agradecer al Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria el haberme dado la oportunidad de realizar prácticas en un entorno de investigación como éste, y el haber podido participar en una campaña de ensayos en el CCOB.

En especial a Alfonso Jurado Fuentes, mi tutor durante la estancia en el IHCantabria y tutor de este trabajo fin de máster. Con él he aprendido a trabajar y a buscar soluciones a los problemas que surgen; y a José Antonio Armesto, que me ha ayudado a entender y a realizar la calibración y validación del modelo numérico.

También agradecer a Raúl Guanche, que me seleccionó para trabajar en su equipo, y a todo el equipo de Ingeniería Offshore y Energías Marinas.

Y, como no, gracias a Marta, mi compañera, amiga y *hermana*, con la que he compartido experiencias, desvelos y triunfos... y con la que espero seguir contando en nuestros proyectos soñados.

ANEJO DE RESULTADOS

Índice

1. Introducción	2
2. Resultados Ensayos de Extinción (Decay Tests)	2
2.1.1. Sólido rígido Cuasiestático	2
2.1.2. Sólido rígido Dinámico	4
2.1.3. Multicuerpo Dinámico.....	6
3. Resultados de Oleaje Regular.....	7
3.1. RAOs	7
3.1. Series temporales de movimientos.....	17
4. Resultados de Oleaje Irregular	42
4.1. Series temporales de movimientos.....	54

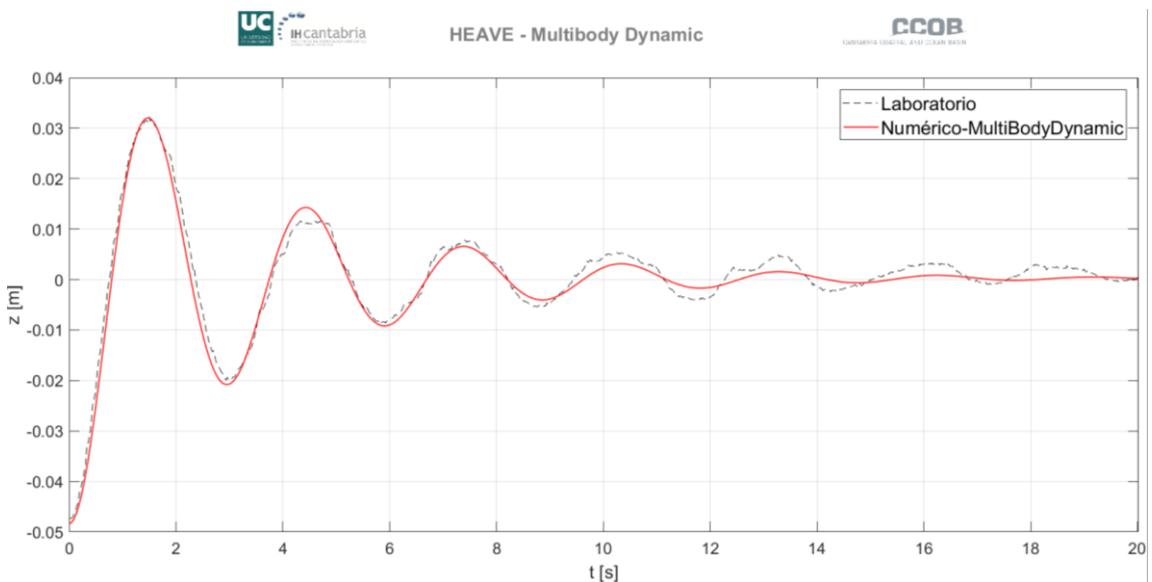
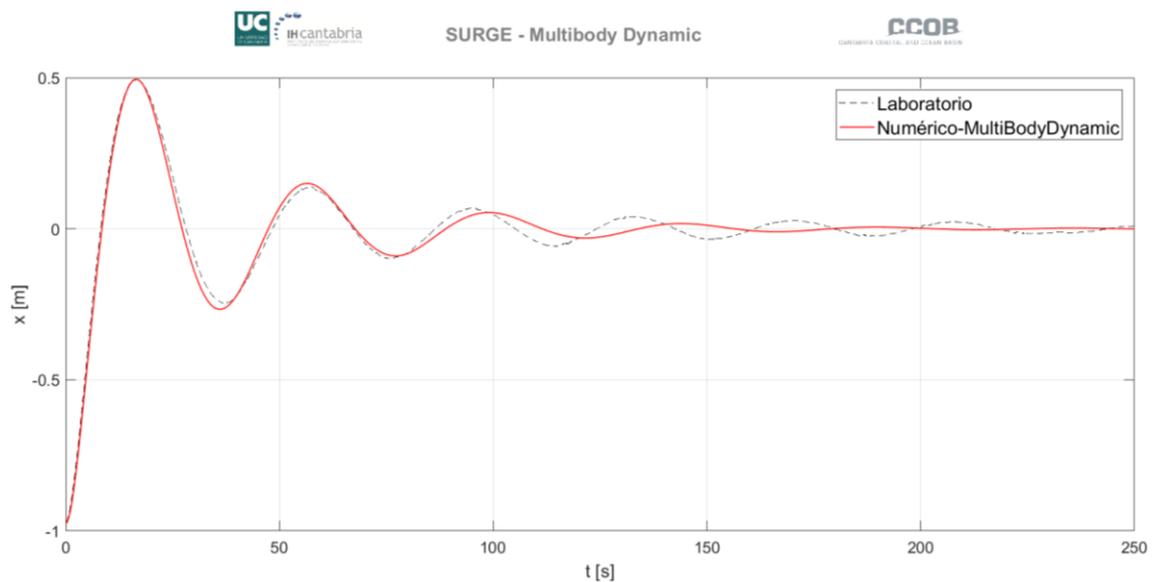
1. Introducción

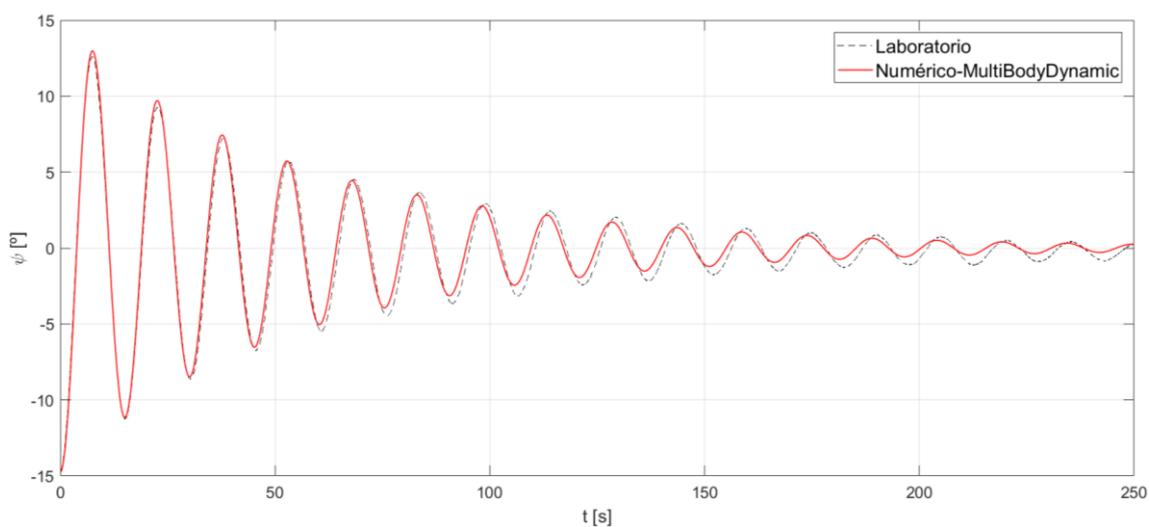
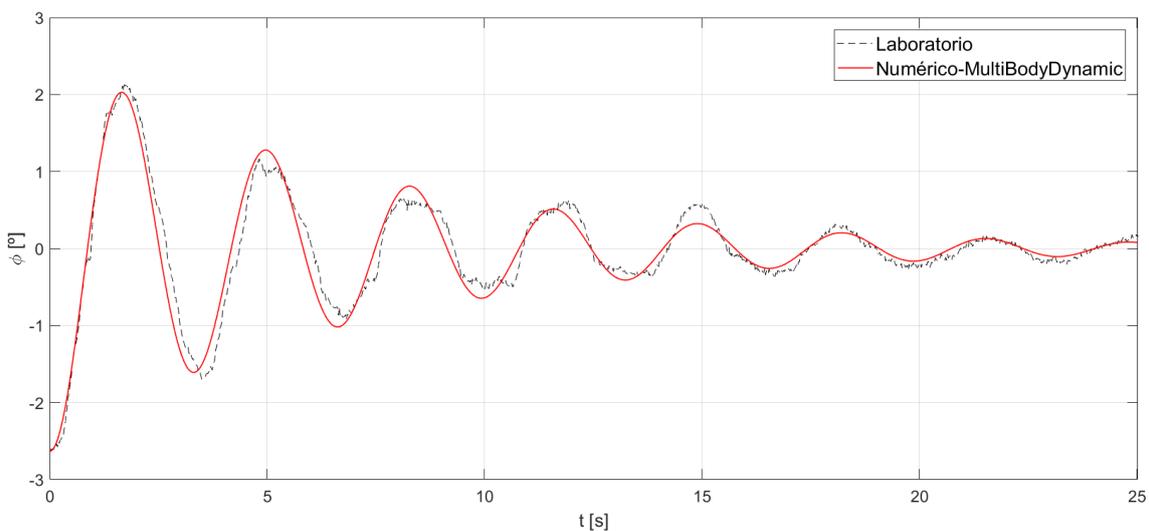
En este anejo se exponen todos los resultados obtenidos procedentes de la calibración y validación del modelo numérico.

2. Resultados Ensayos de Extinción (Decay Tests)

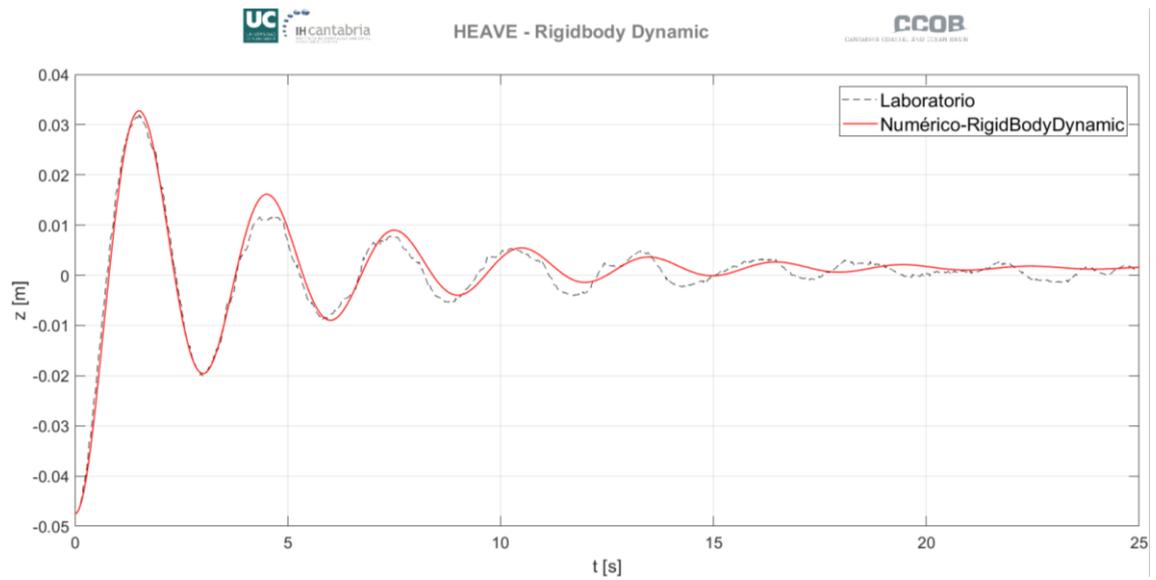
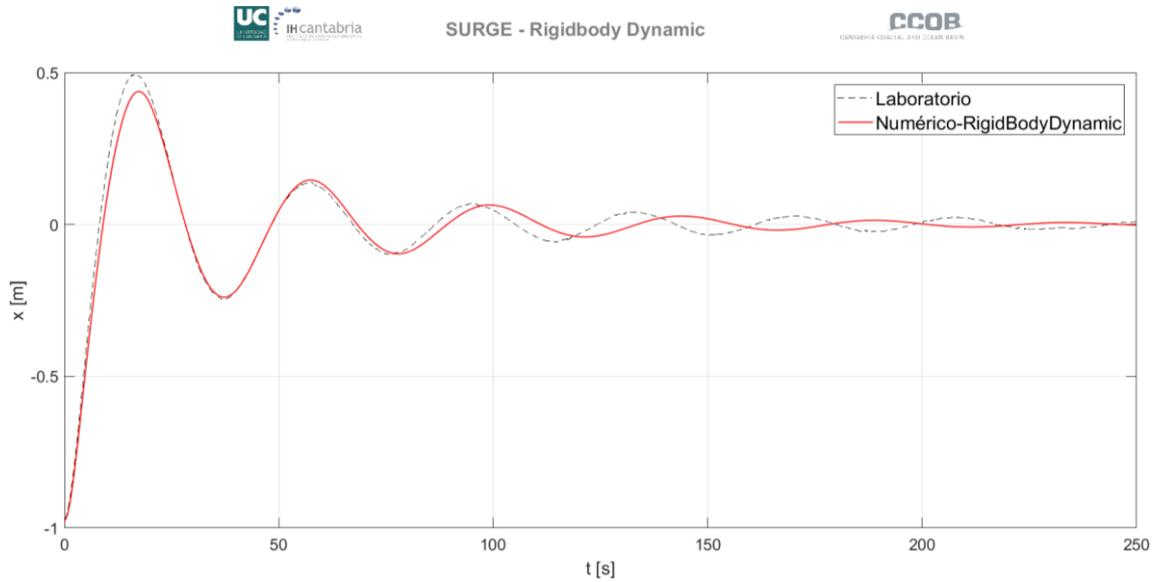
A continuación, se presentan los resultados calibrados obtenidos con el modelo numérico y comparados con los datos de laboratorio para la estructura multicuerpo y para sólido rígido, tanto dinámico como cuasiestático. Dada la doble simetría de la estructura y del sistema de fondeo, los resultados de los GdL sway y roll en esta tipología de ensayos son iguales a surge y pitch, respectivamente, y no se mostrarán en las siguientes figuras.

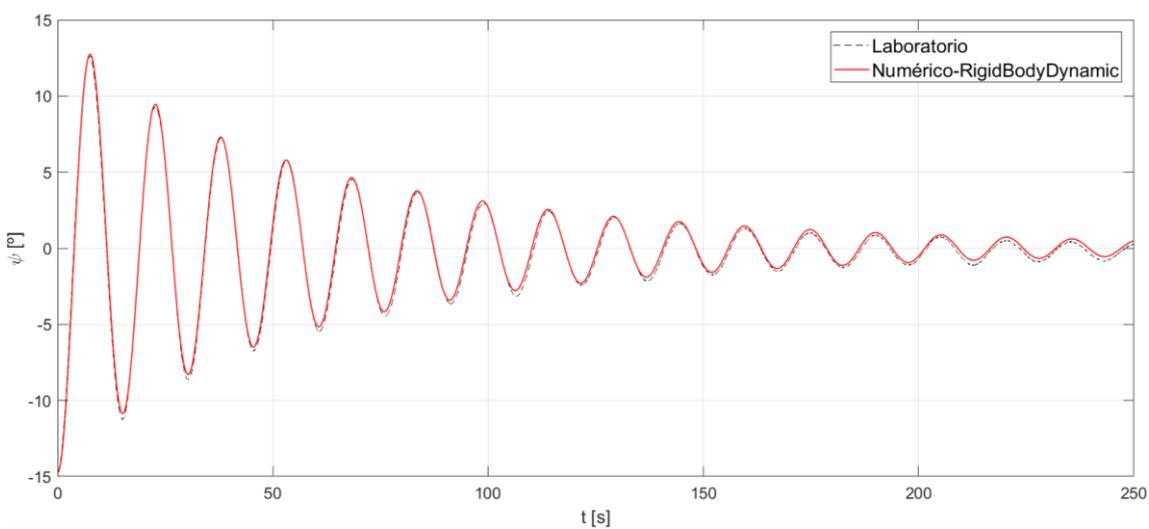
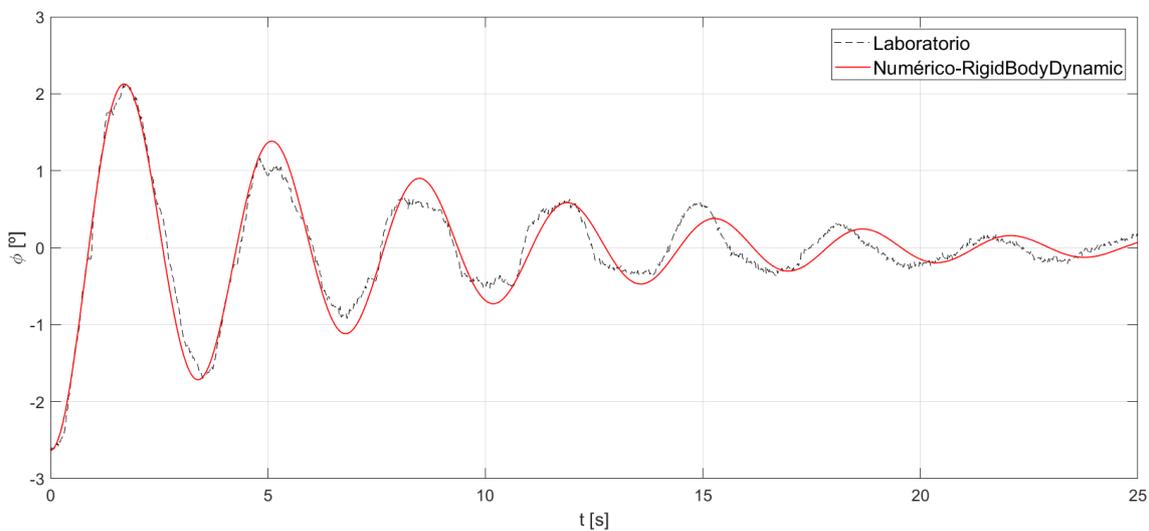
2.1.1. Sólido rígido Cuasiestático



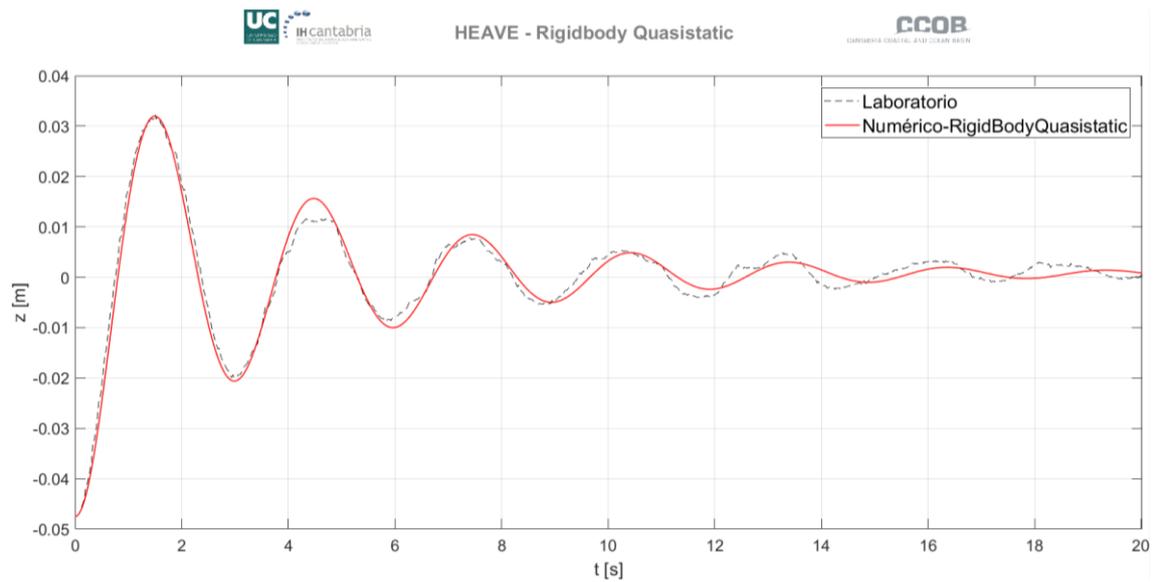
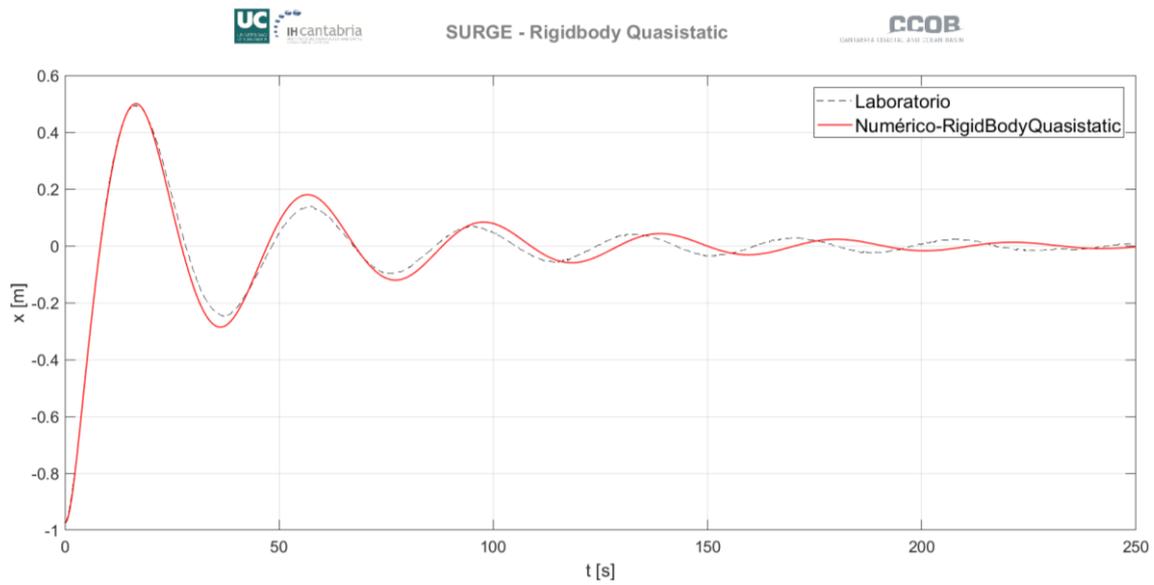


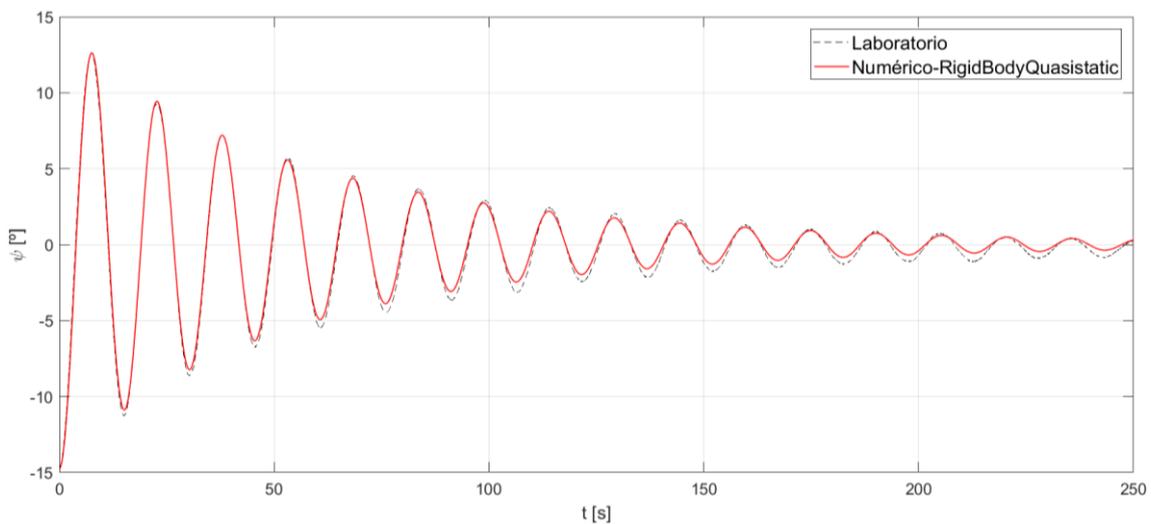
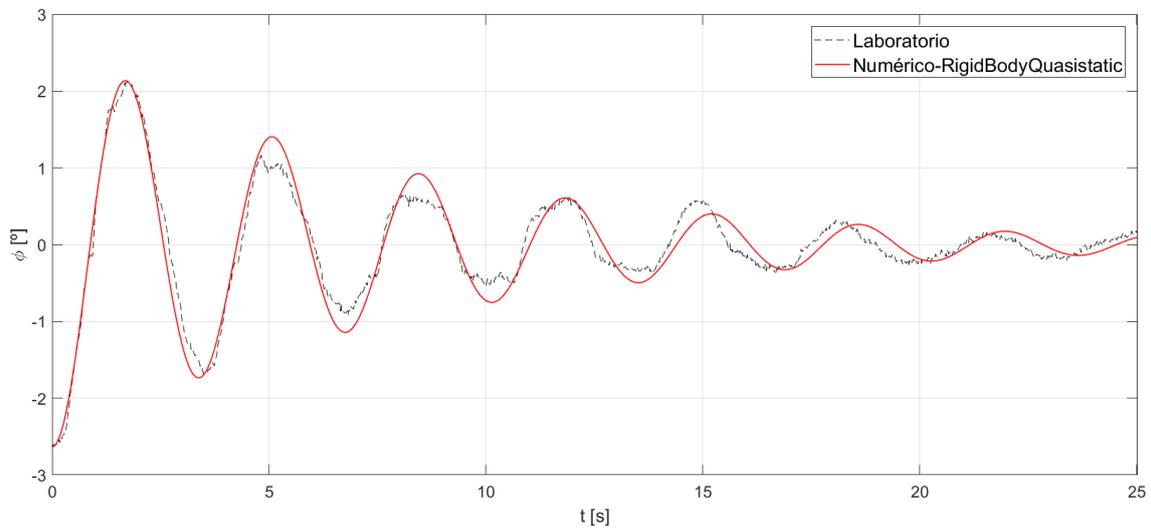
2.1.2. Sólido rígido Dinámico





2.1.3. Multicuerpo Dinámico





3. Resultados de Oleaje Regular

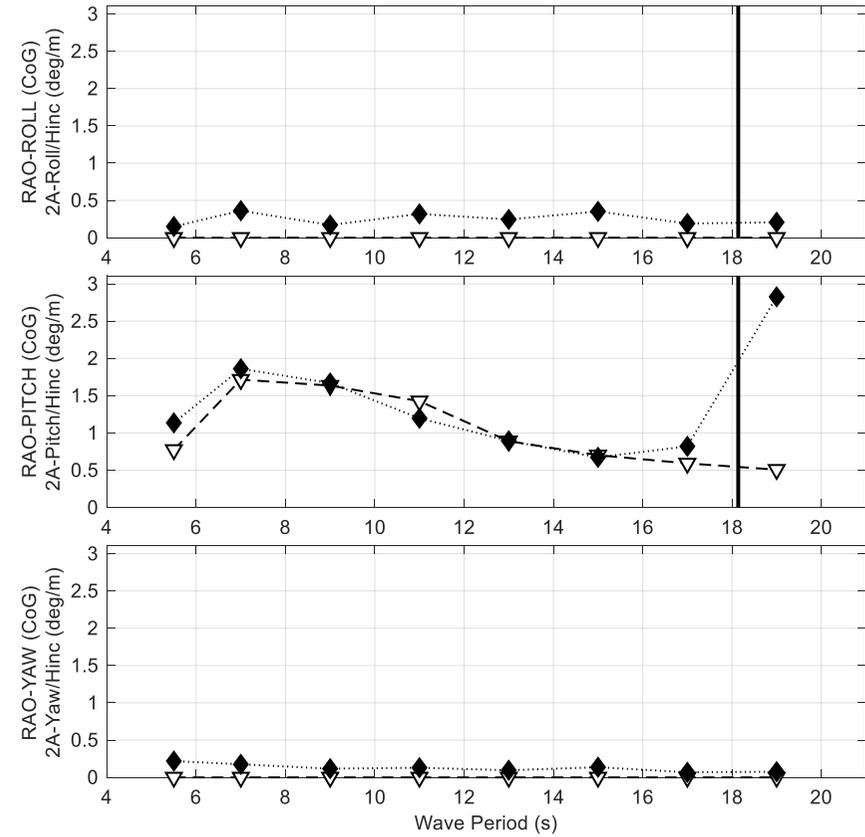
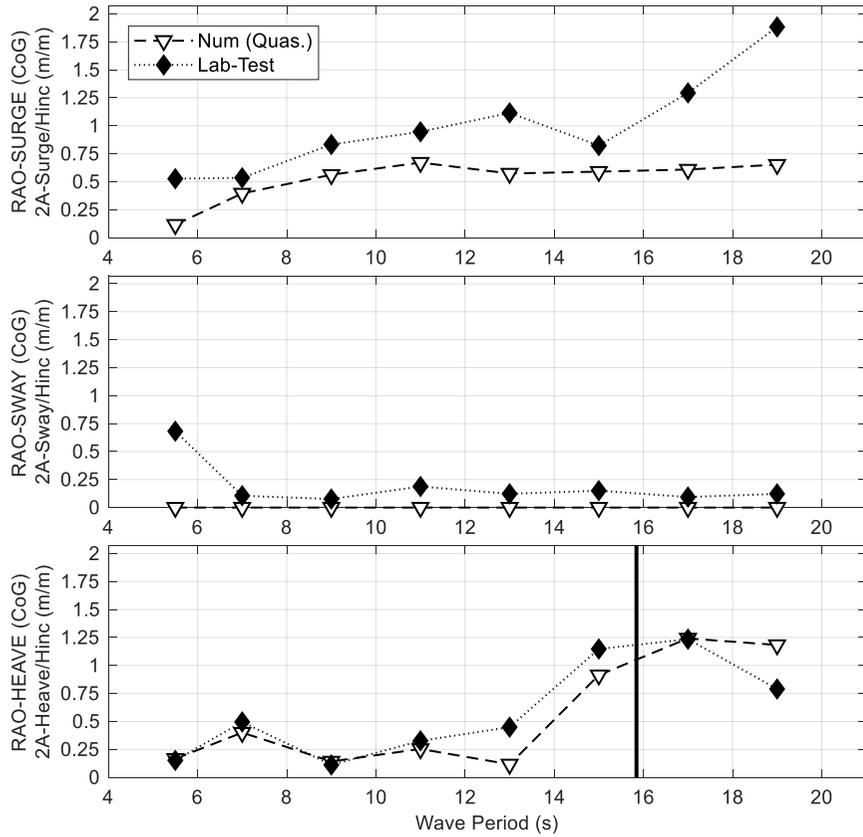
En este apartado se presentan tanto las RAOs de todas las configuraciones de oleaje regular, como todas las series temporales de movimientos de todos los GdL.

3.1. RAOs

En las siguientes figuras se muestran las RAOs de las configuraciones de oleaje C01, C02 y C03 de los tres modelos.

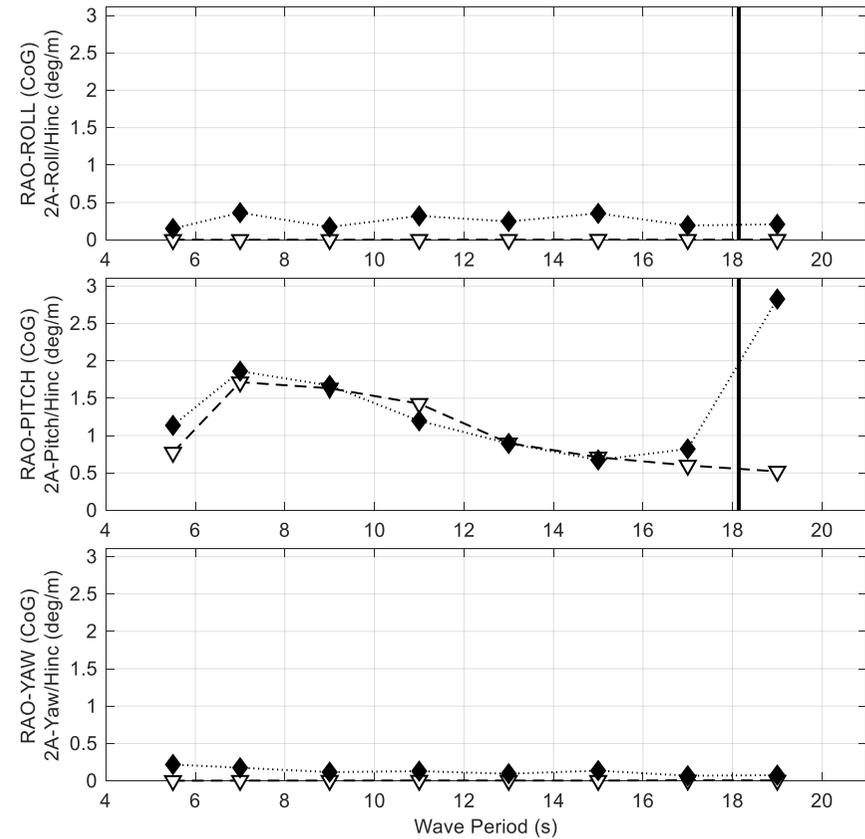
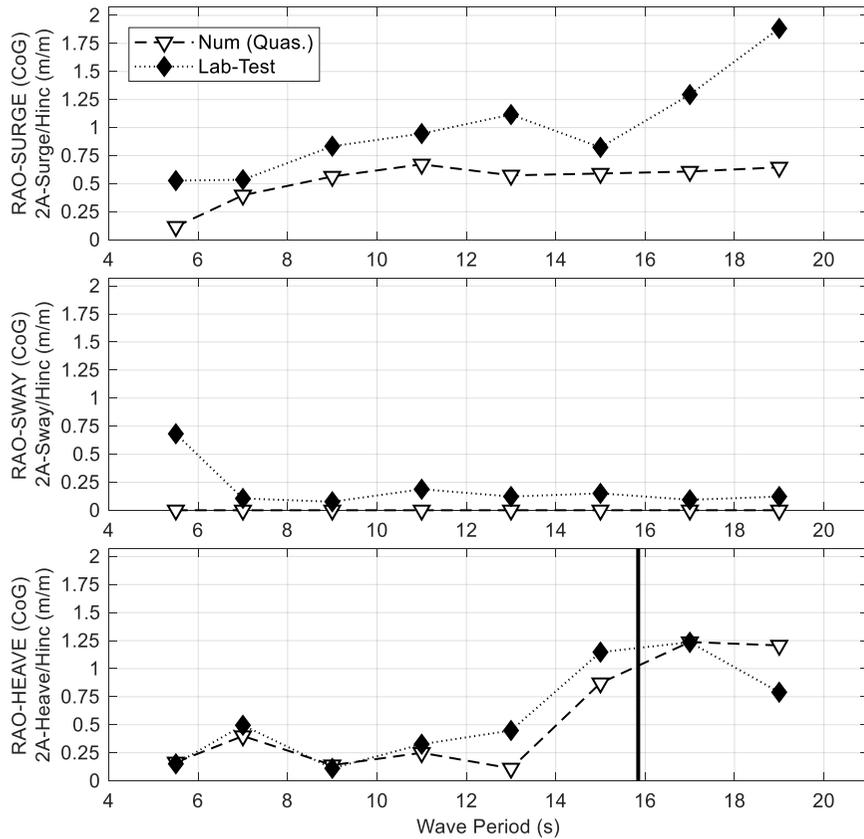
TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C01: H = 1.5m (INC)



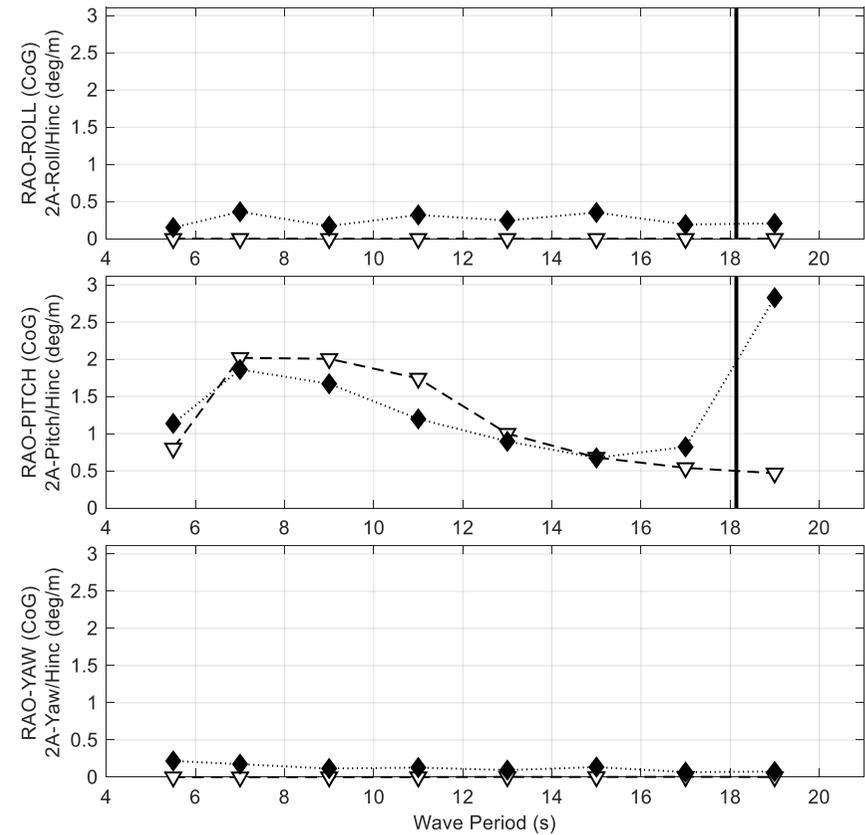
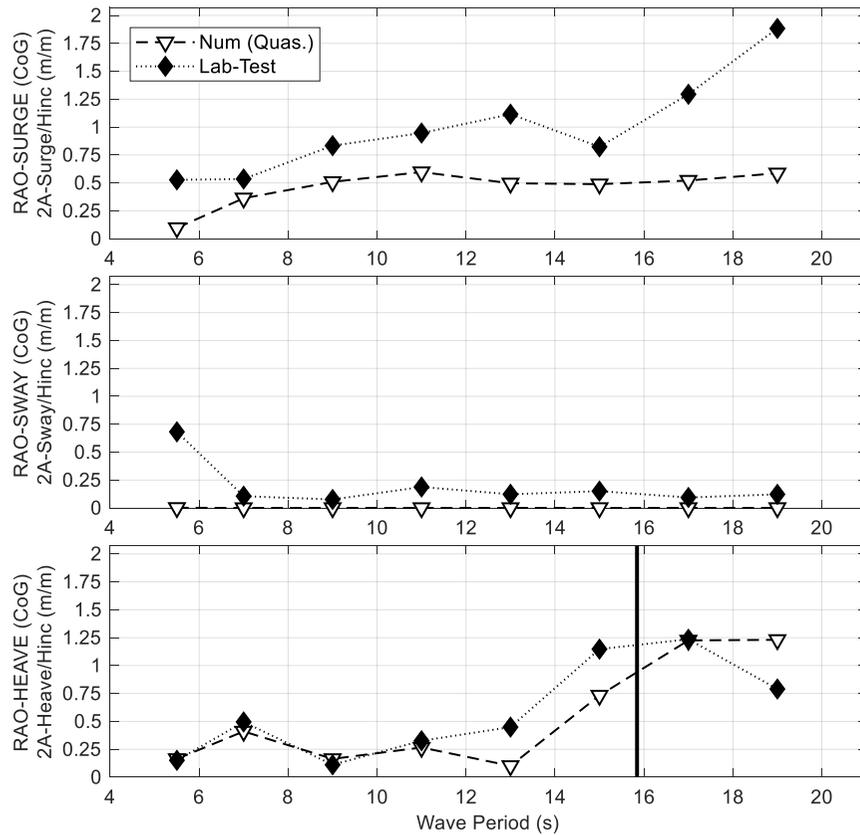
TEN-SHORES. RigidBody-Din(Drift). NUMvsLAB.

C01: H = 1.5m (INC)



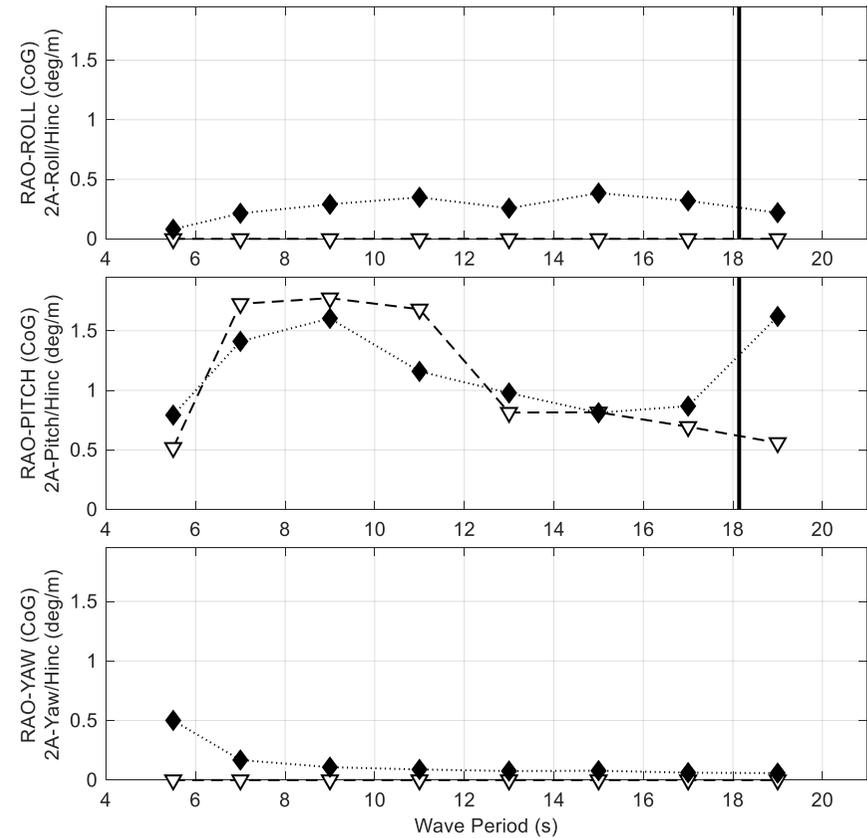
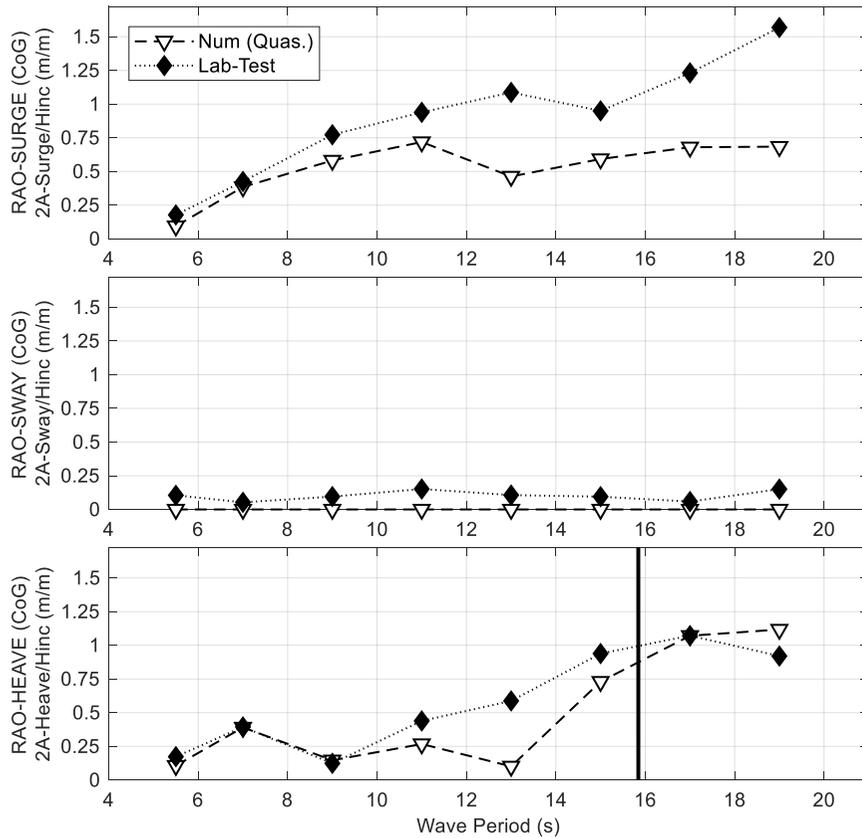
TEN-SHORES. RigidBody-Din(Drift). NUMvsLAB.

C01: H = 1.5m (INC)



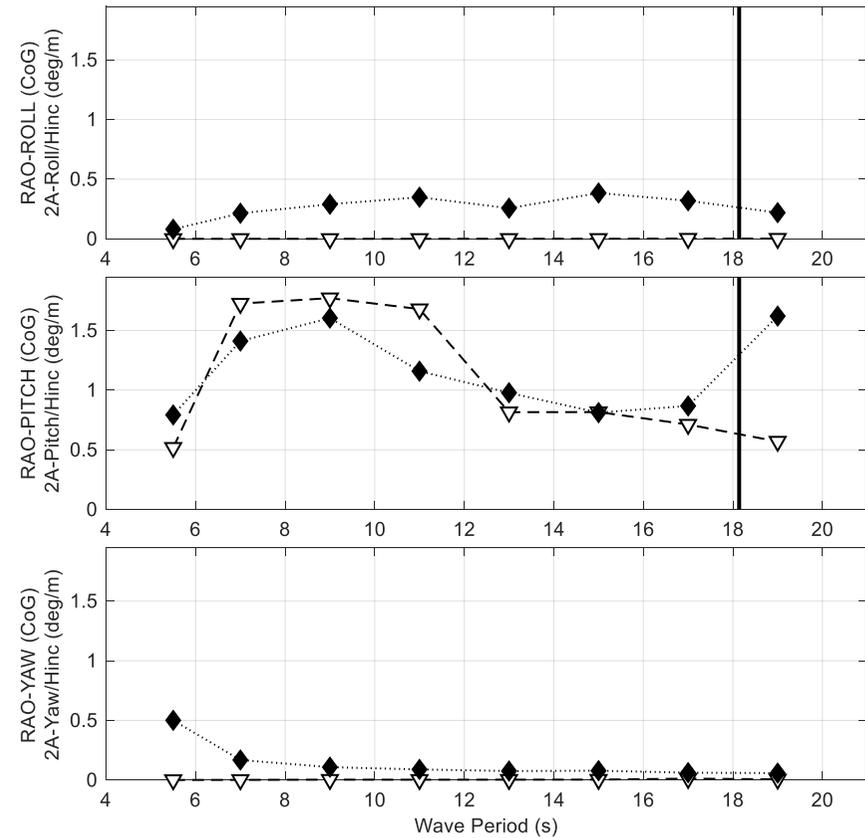
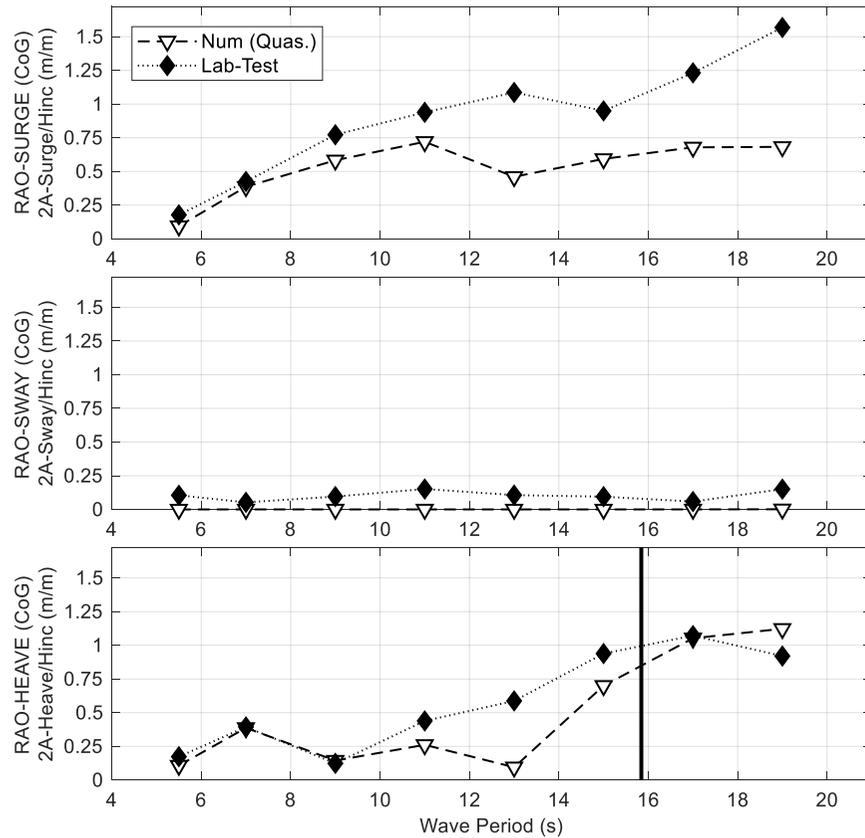
TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C02: H = 3.0m (INC)



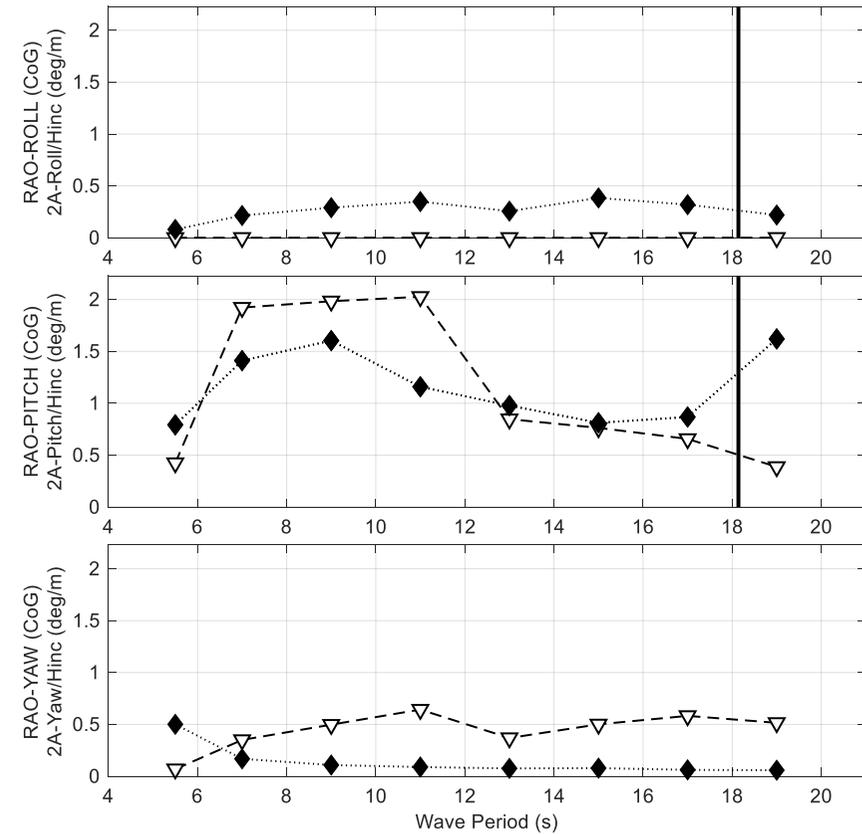
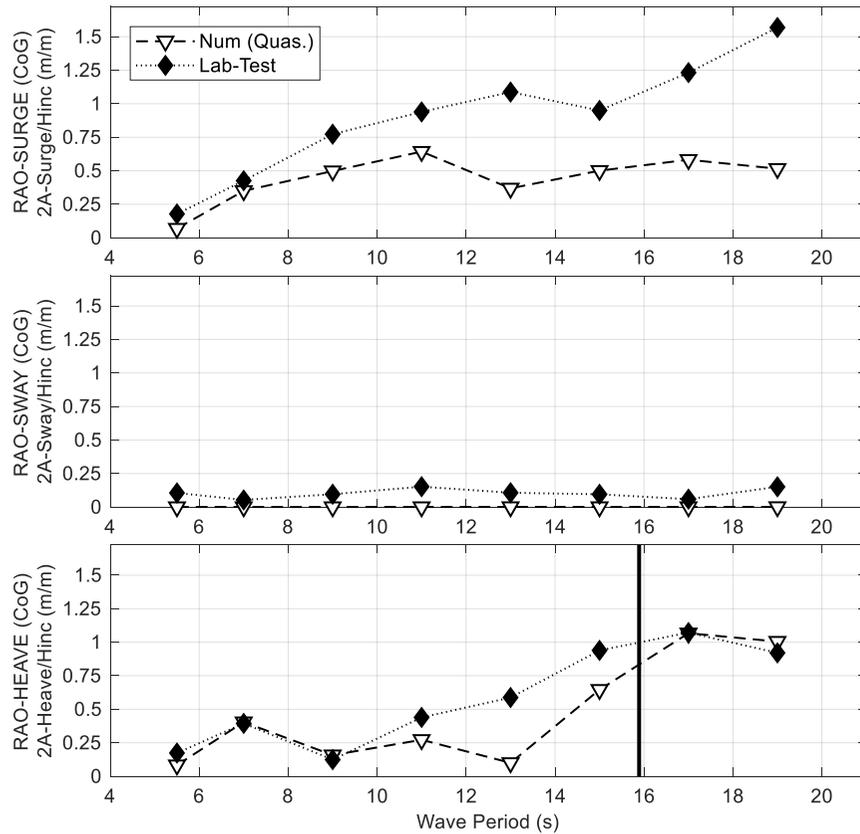
TEN-SHORES. RigidBody-Din(Drift). NUMvsLAB.

C02: H = 3.0m (INC)



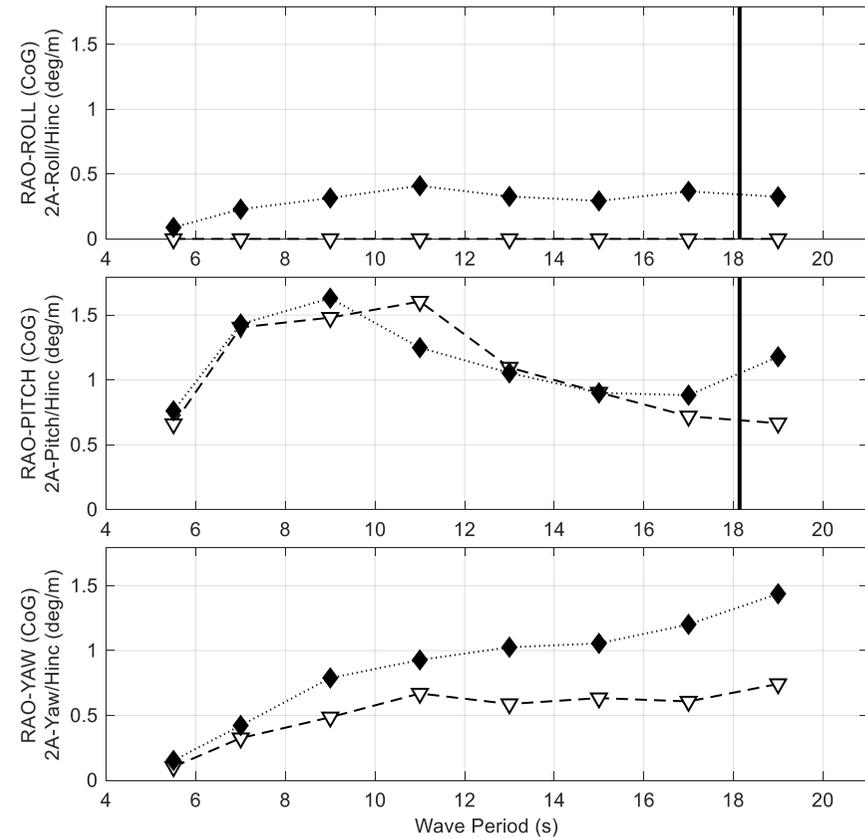
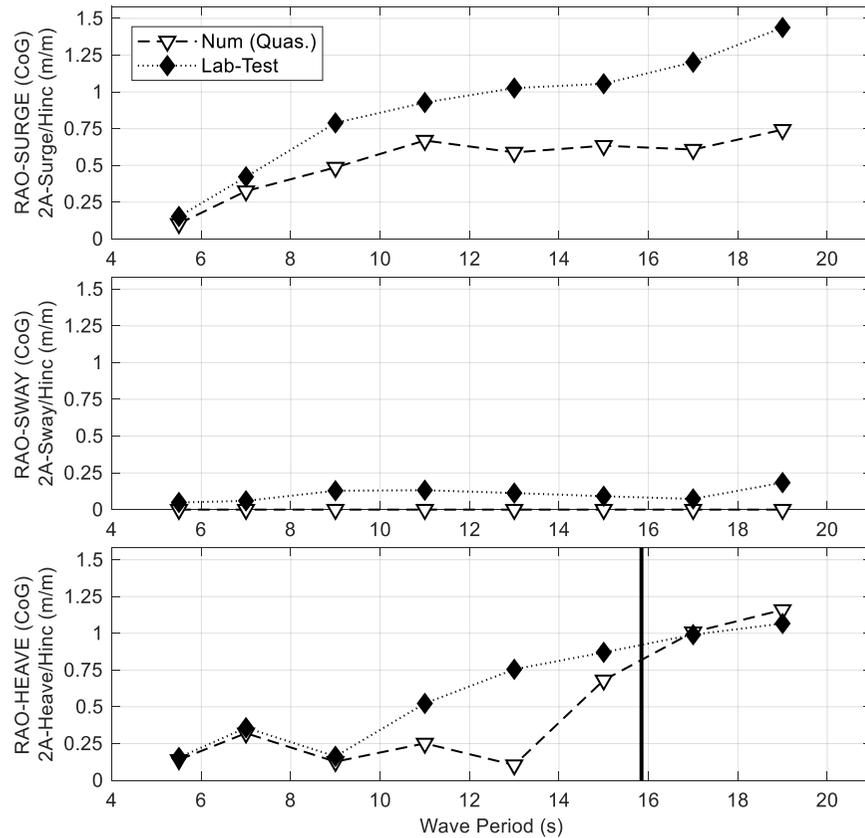
TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C02: H = 3.0m (INC)



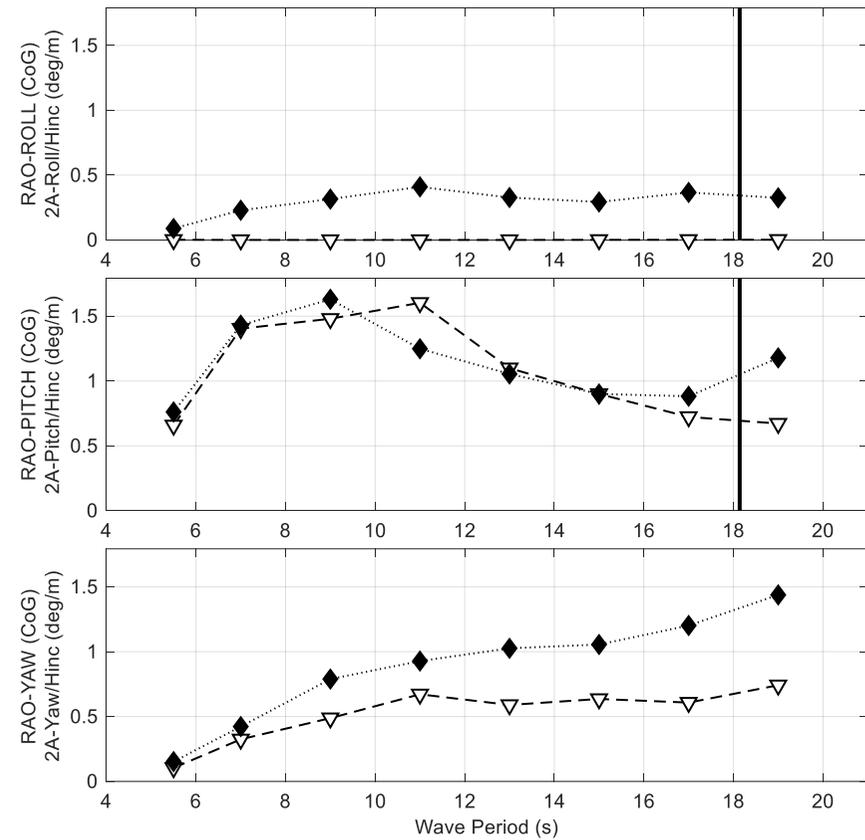
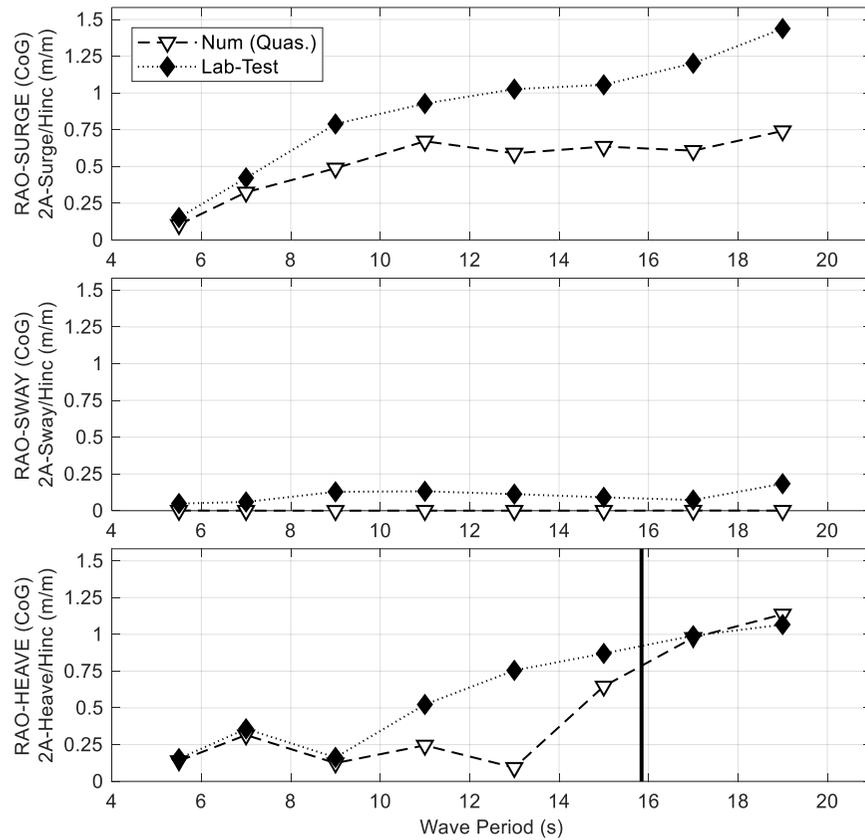
TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C03: H = 5.0m (INC)



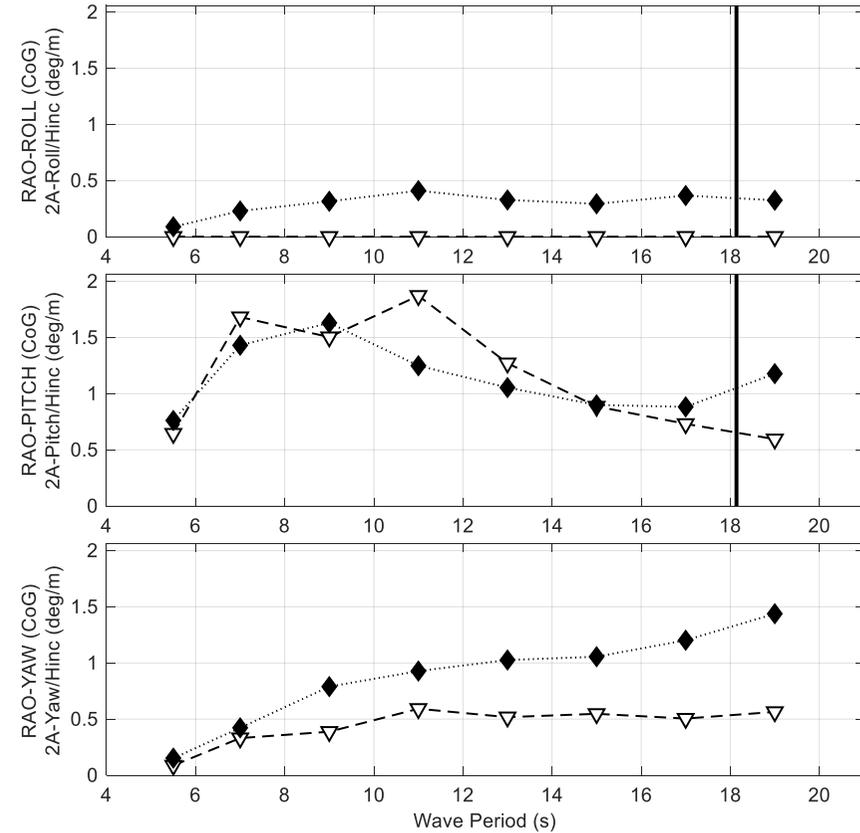
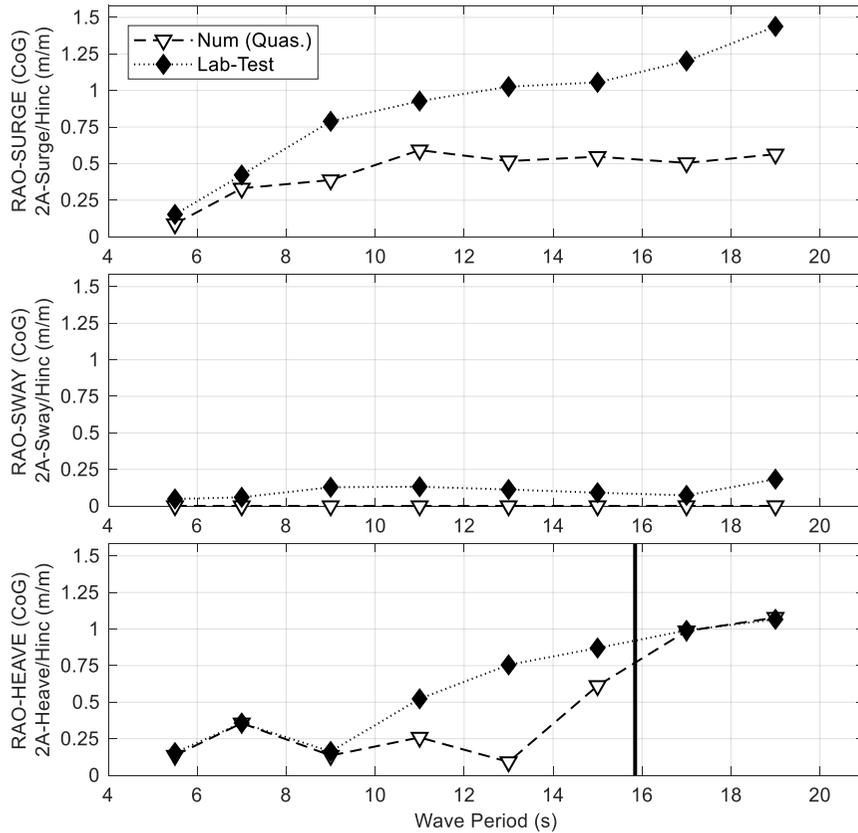
TEN-SHORES. RigidBody-Din(Drift). NUMvsLAB.

C03: H = 5.0m (INC)



TEN-SHORES. RigidBody-QS(Drift). NUMvsLAB.

C03: H = 5.0m (INC)

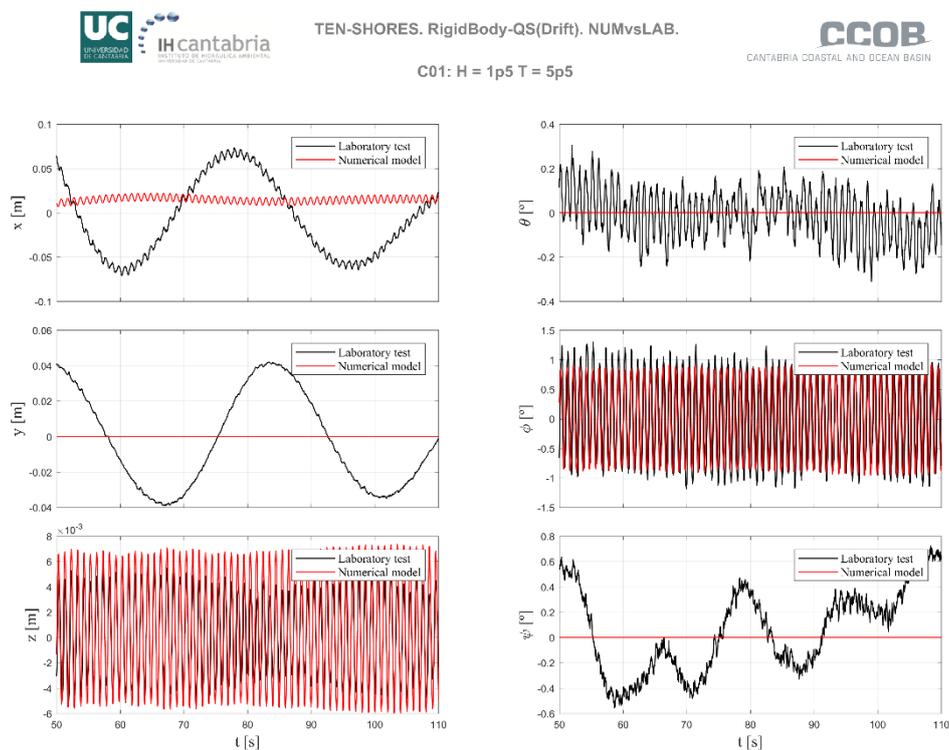


3.1. Series temporales de movimientos

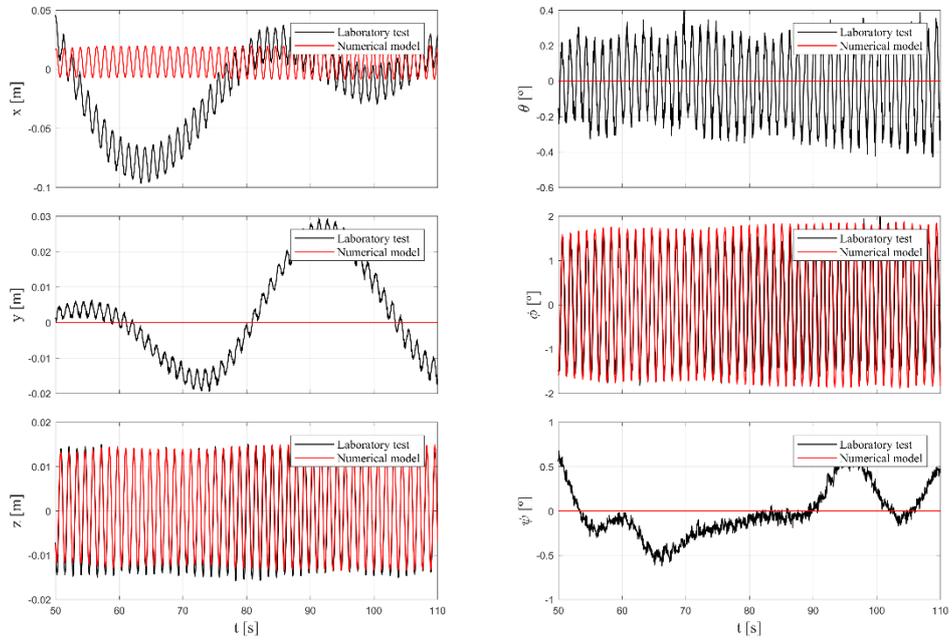
En este apartado se presentan las series temporales de movimientos de todos los GdL para cada una de las tres configuraciones de oleaje regular C01, C02 y C03.

3.1.1. Sólido rígido Cuasiestático

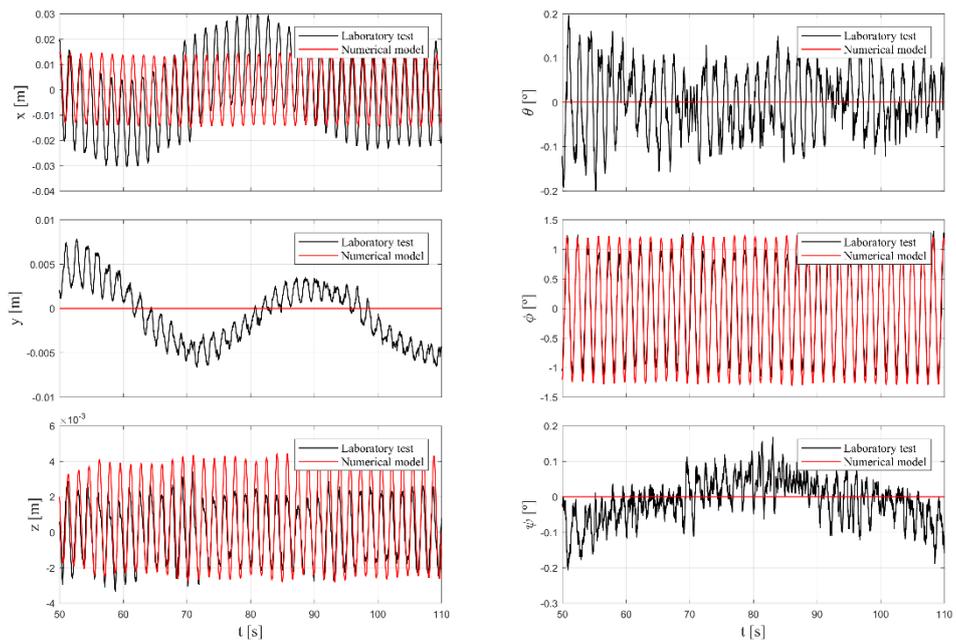
3.1.1.1. Configuración C01



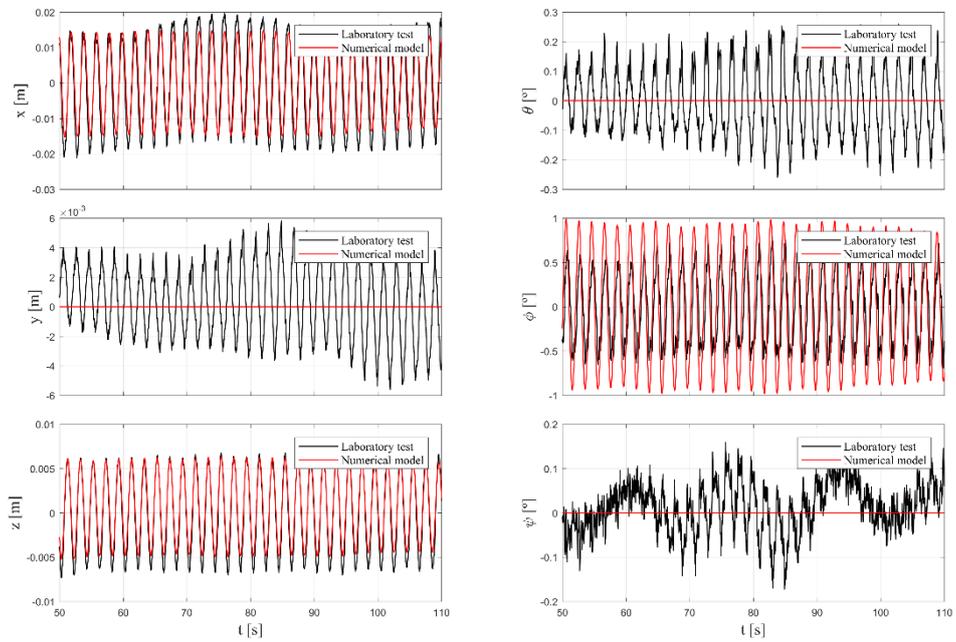
C01: $H = 1p5$ $T = 7p0$



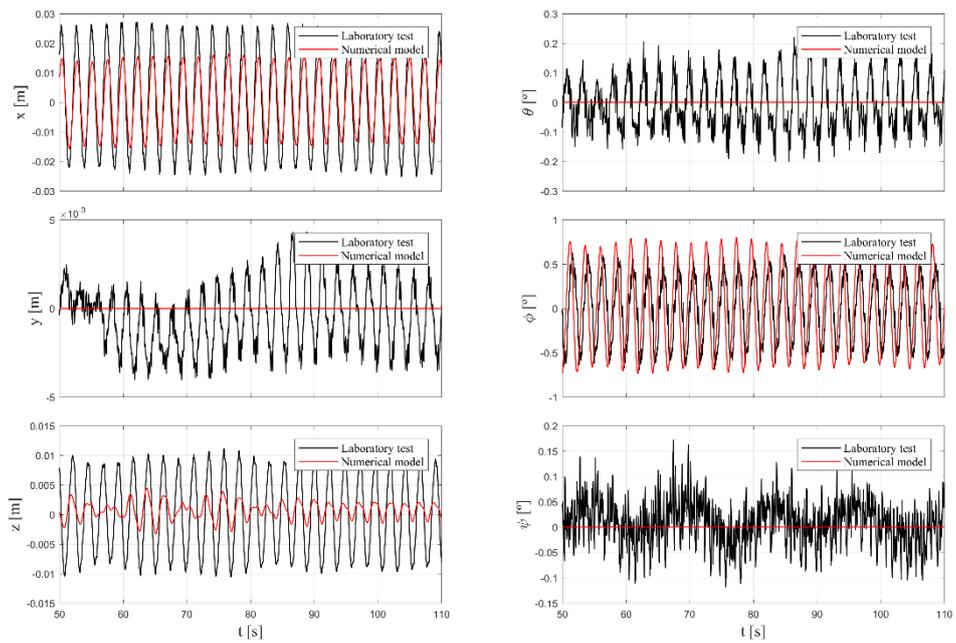
C01: $H = 1p5$ $T = 9p0$



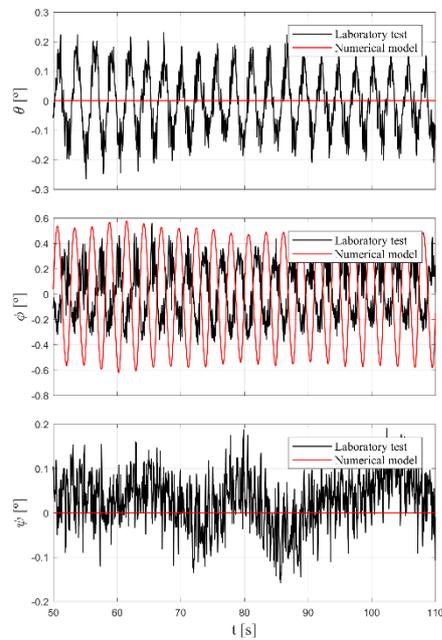
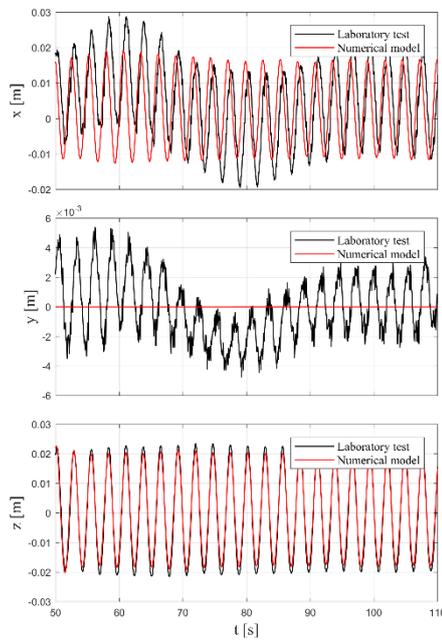
C01: H = 1p5 T = 11p0



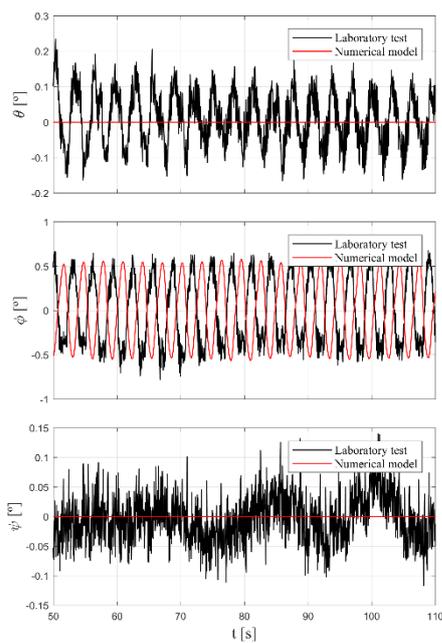
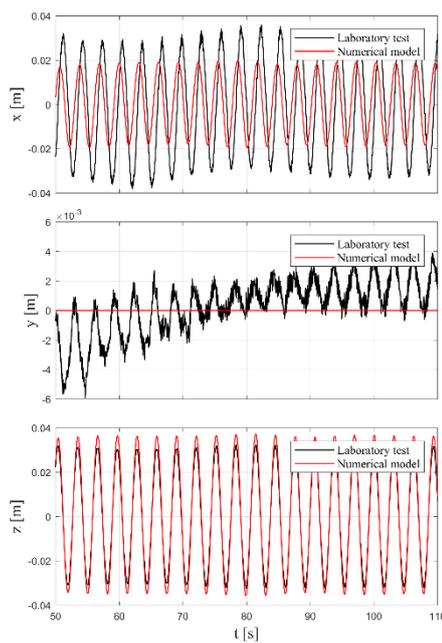
C01: H = 1p5 T = 13p0



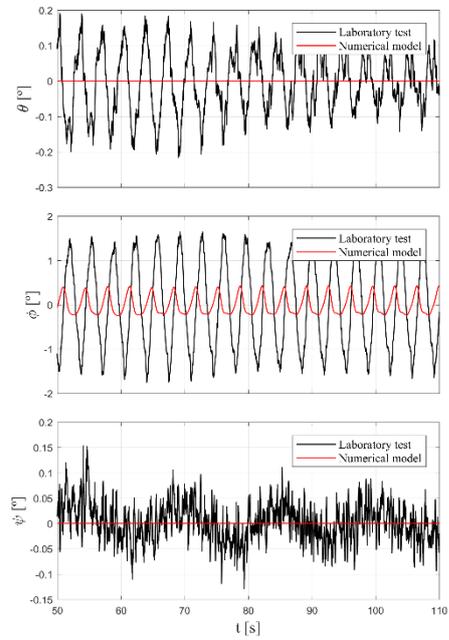
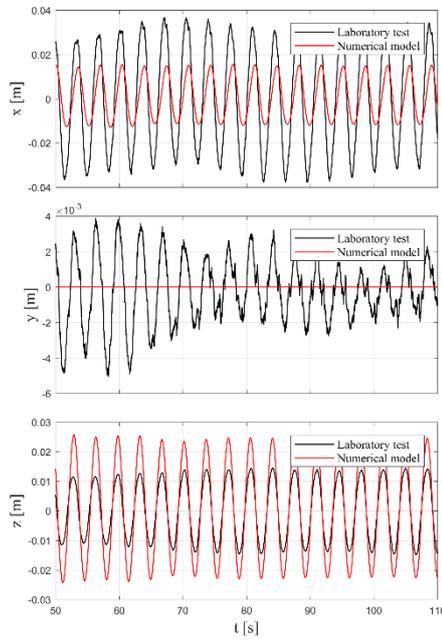
C01: H = 1p5 T = 15p0



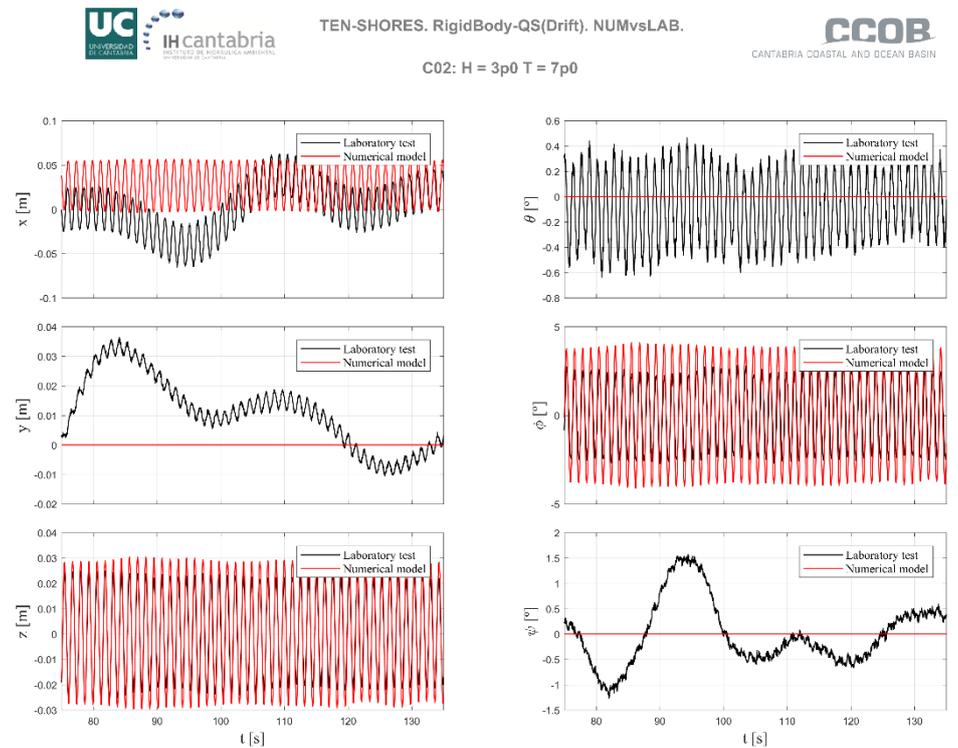
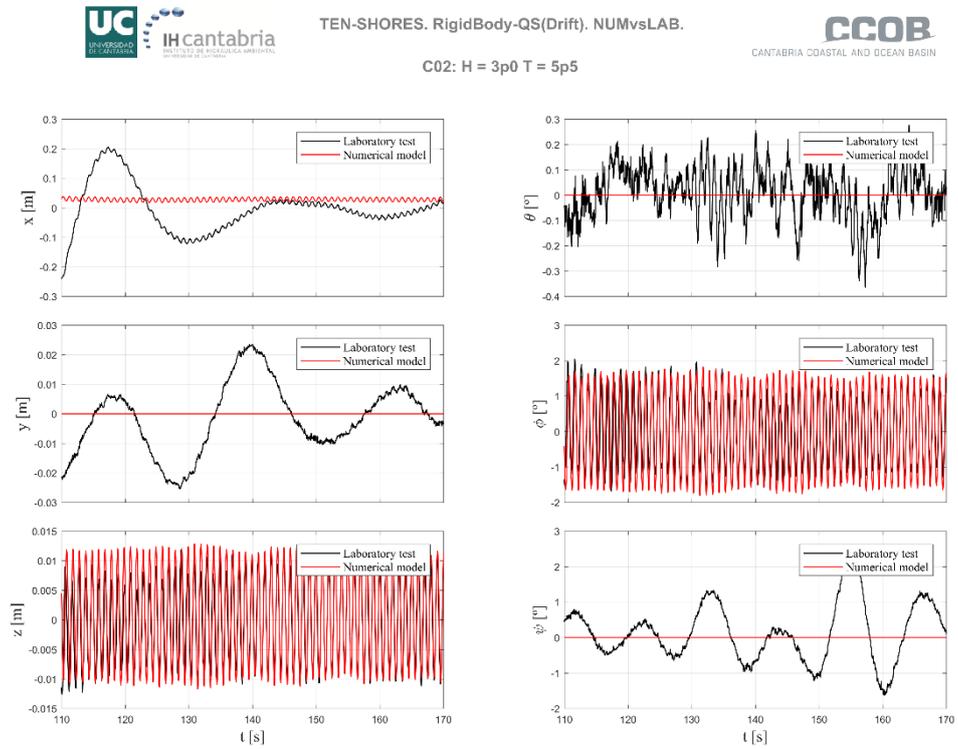
C01: H = 1p5 T = 17p0



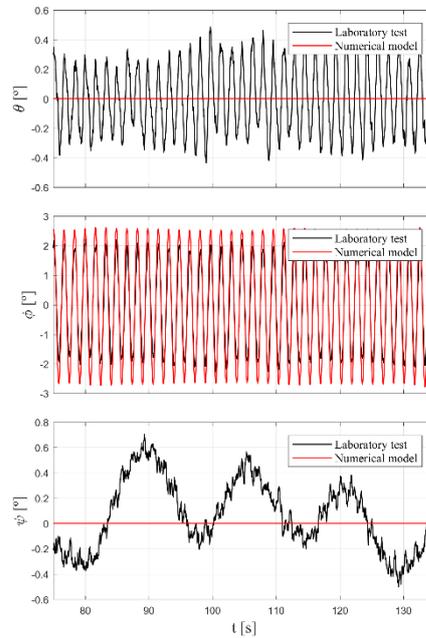
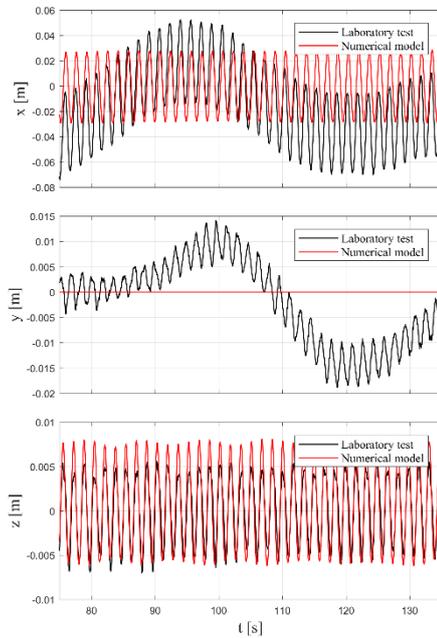
C01: $H = 1p5$ $T = 19p0$



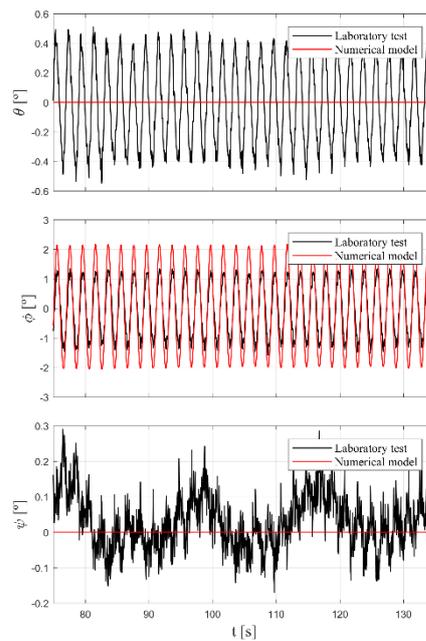
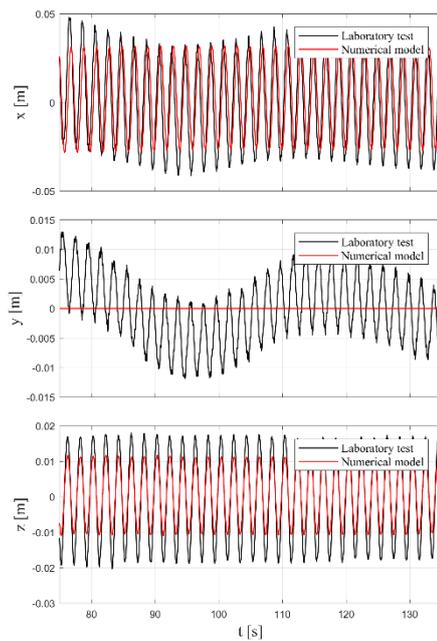
3.1.1.2. Configuración C02



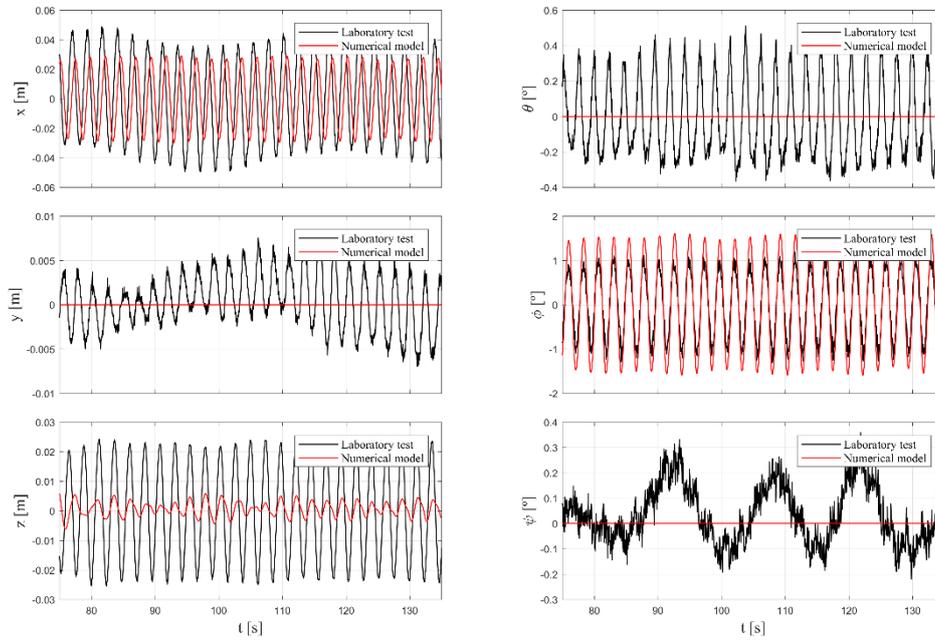
C02: $H = 3p_0$ $T = 9p_0$



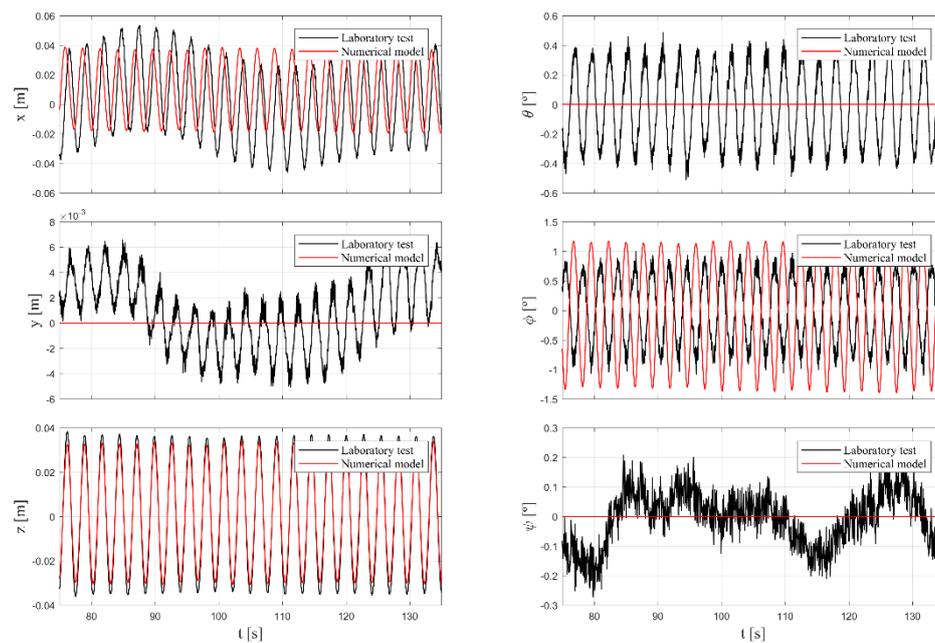
C02: $H = 3p_0$ $T = 11p_0$



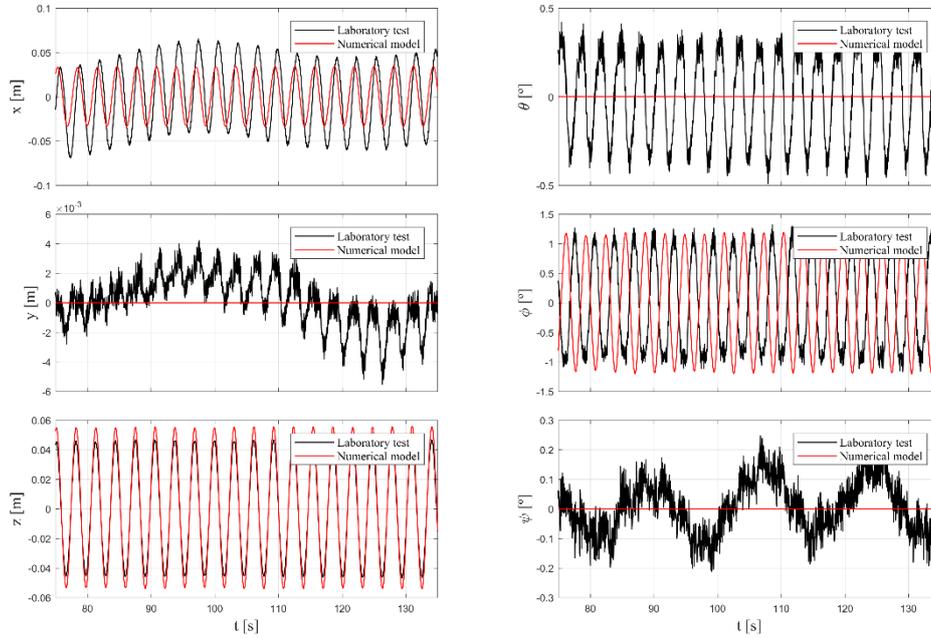
C02: H = 3p0 T = 13p0



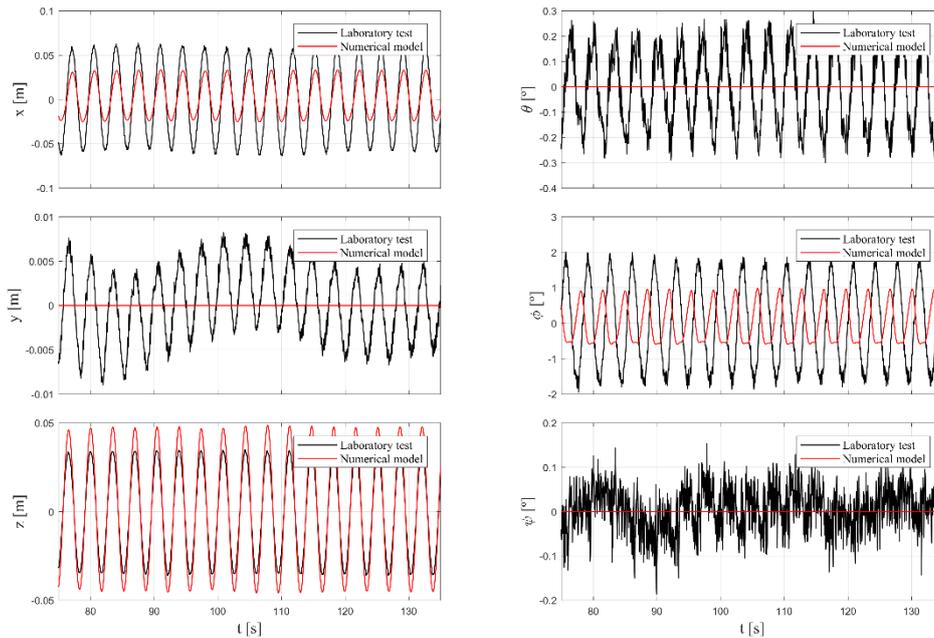
C02: H = 3p0 T = 15p0



C02: H = 3p0 T = 17p0

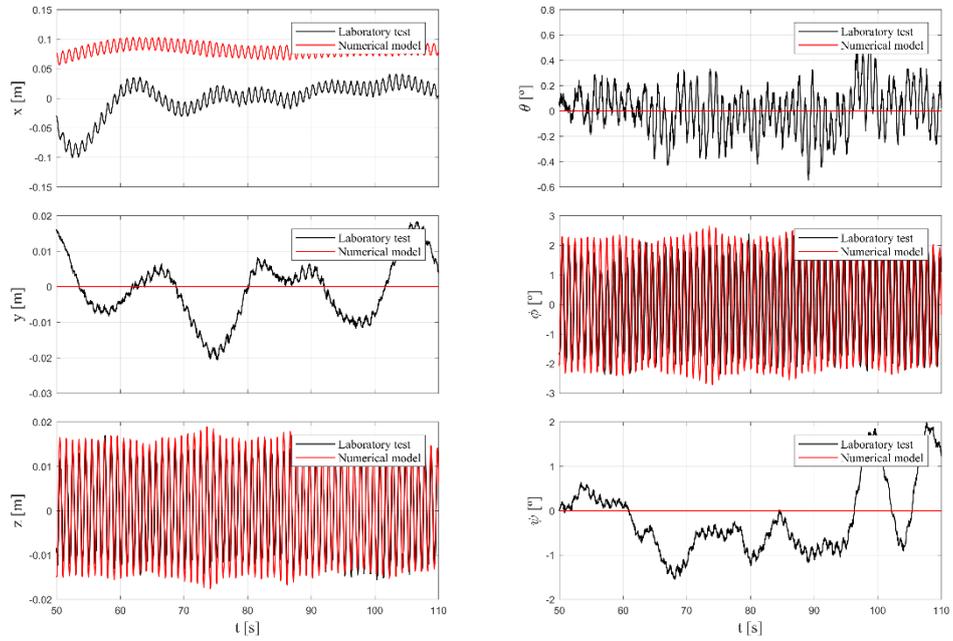


C02: H = 3p0 T = 19p0

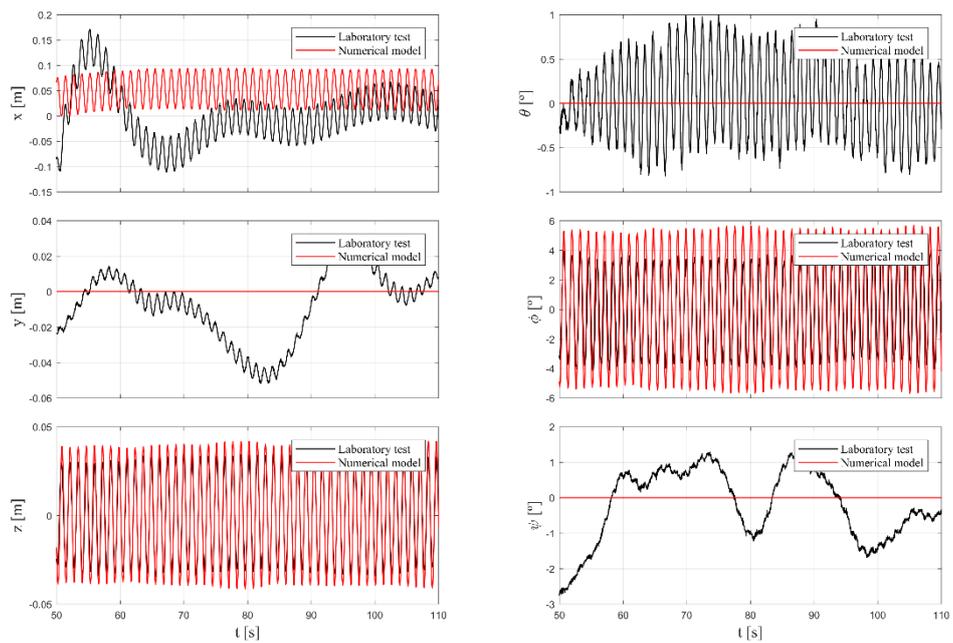


3.1.1.3. Configuración C03

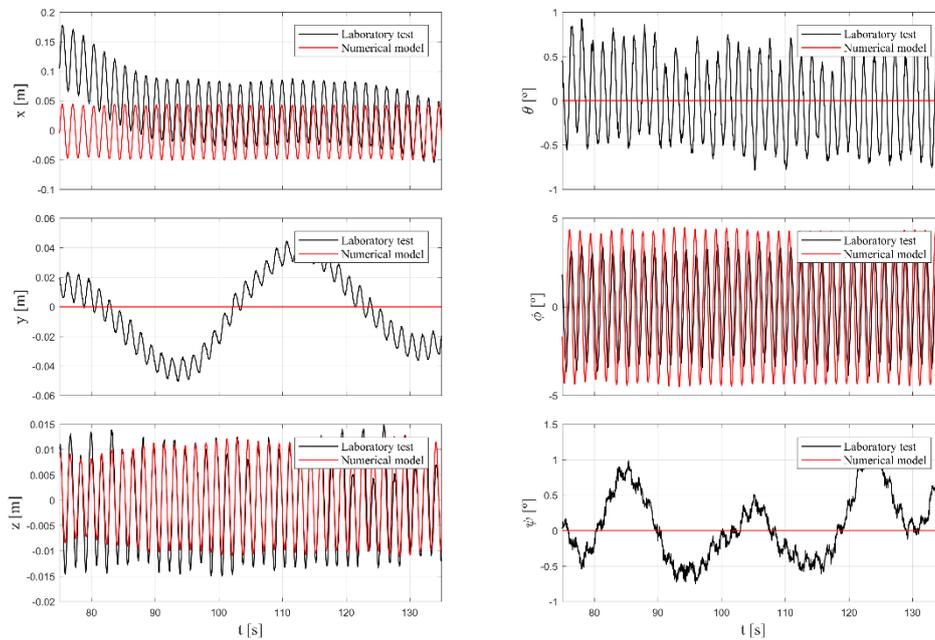
C03: H = 5p0 T = 5p5



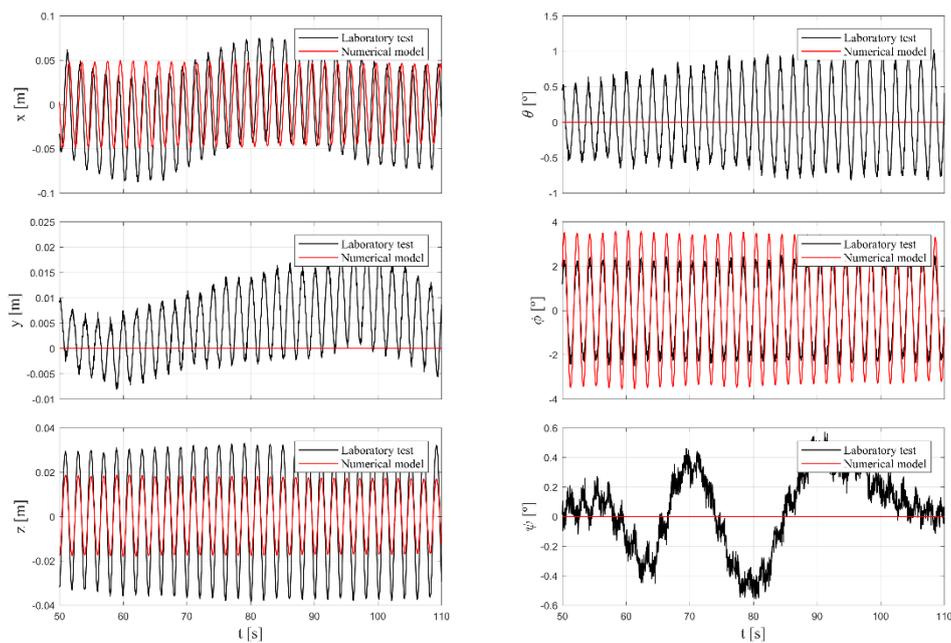
C03: H = 5p0 T = 7p0



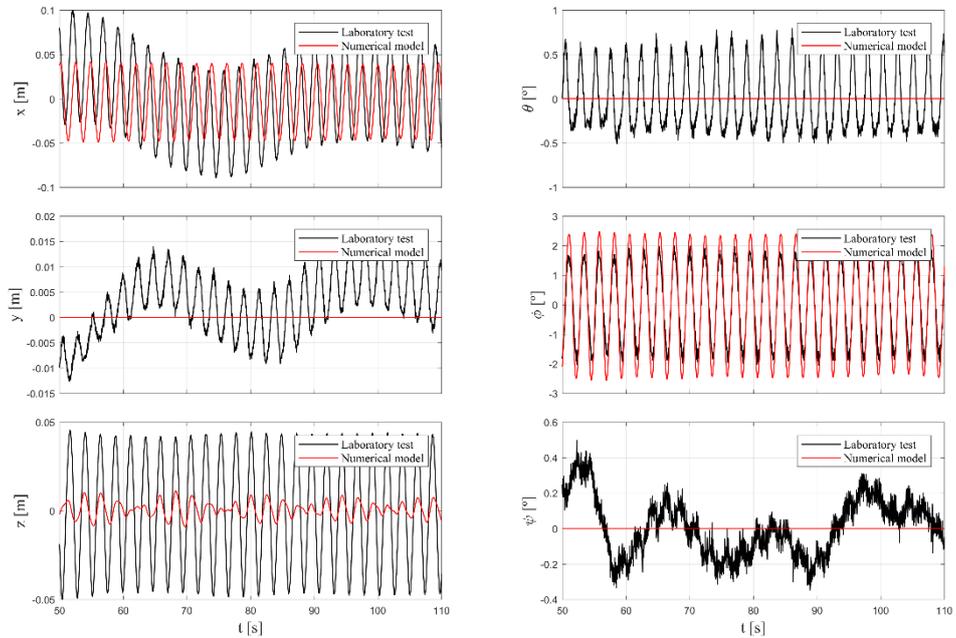
C03: H = 5p0 T = 9p0



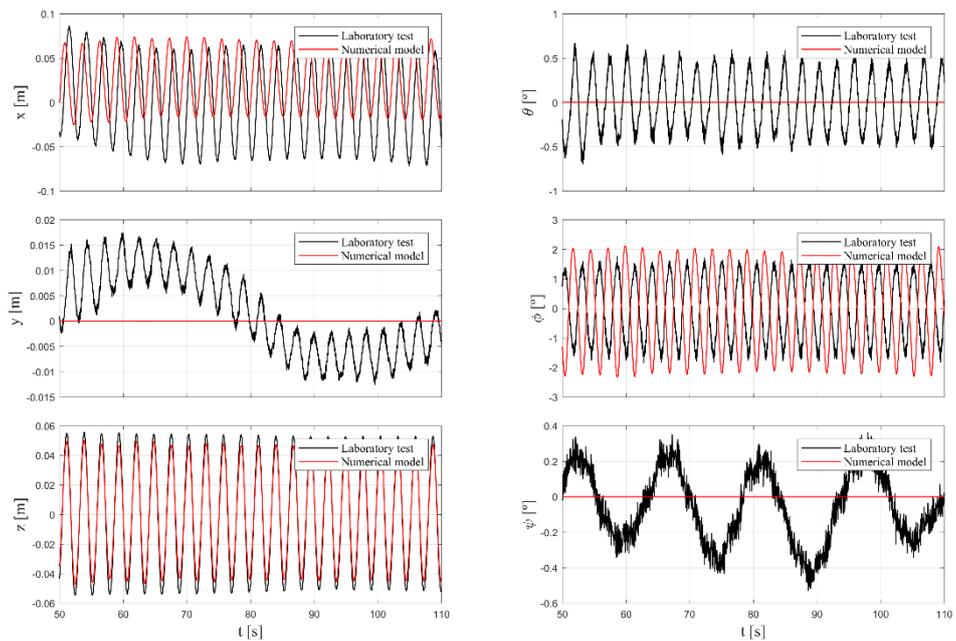
C03: H = 5p0 T = 11p0



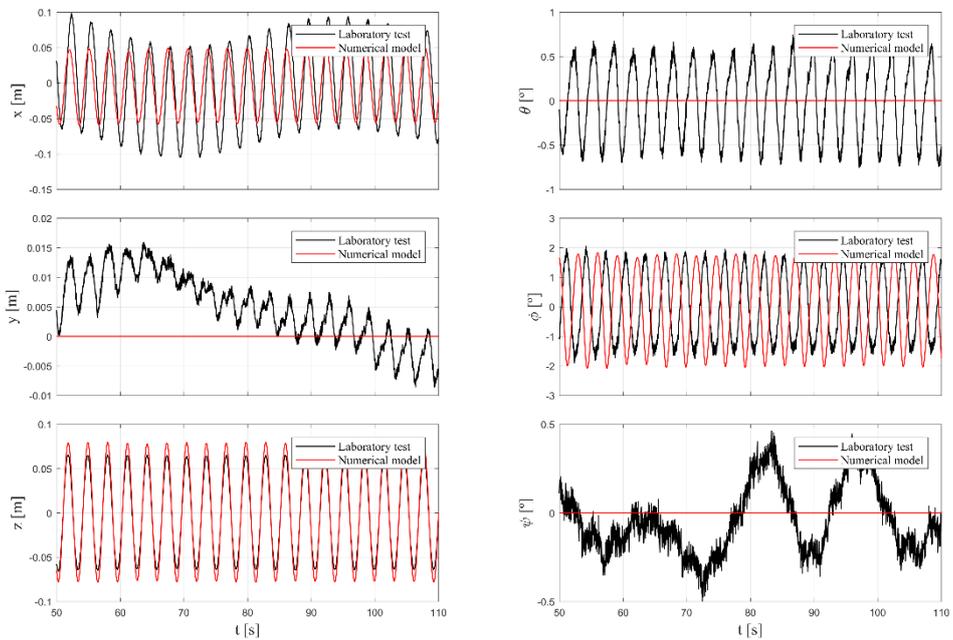
C03: H = 5p0 T = 13p0



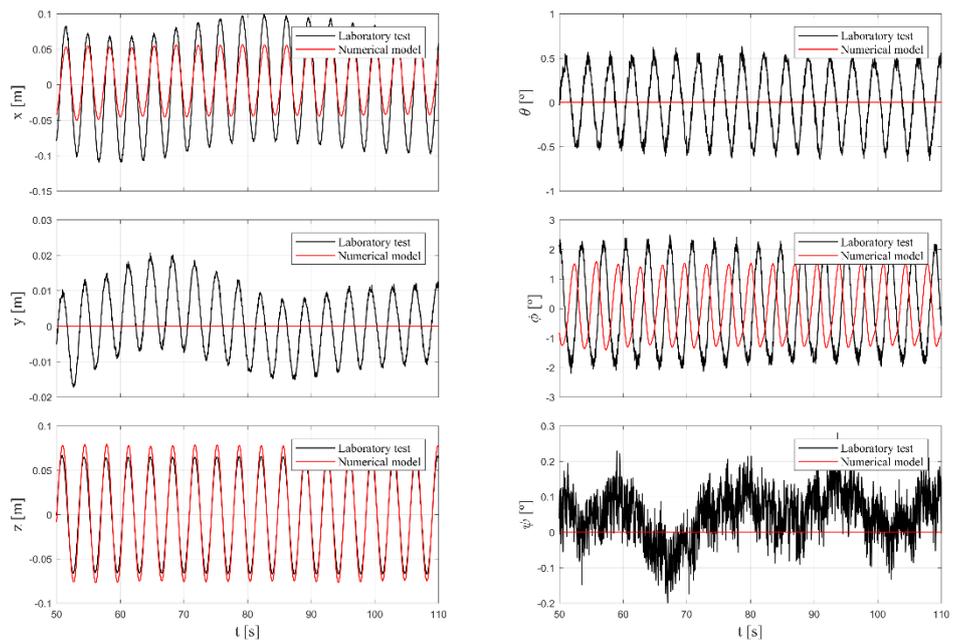
C03: H = 5p0 T = 15p0



C03: H = 5p0 T = 17p0

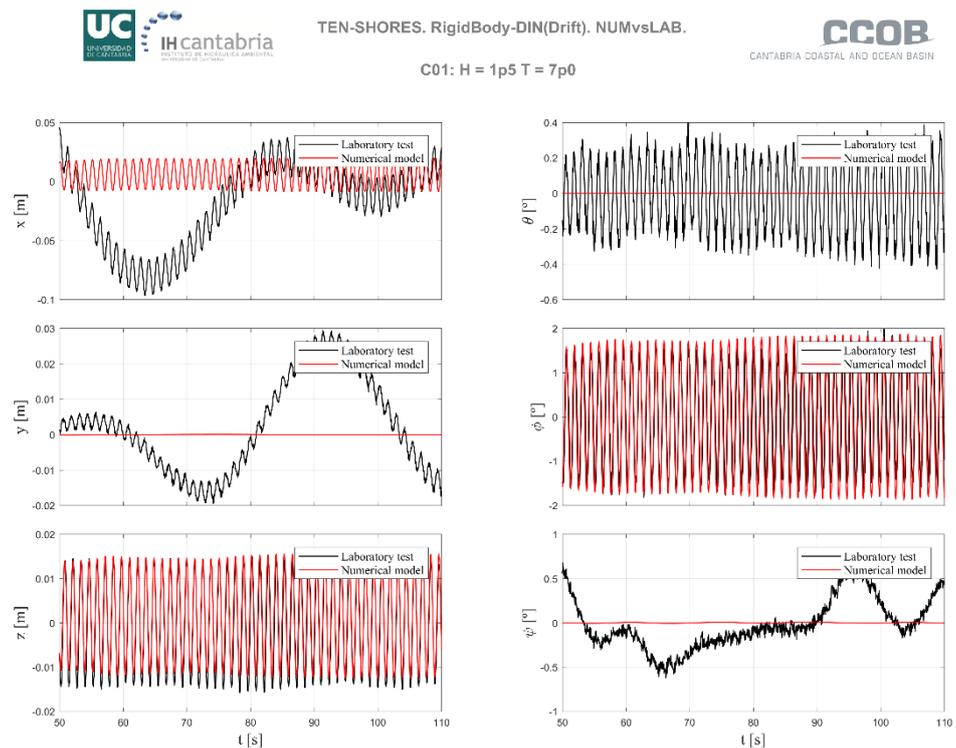
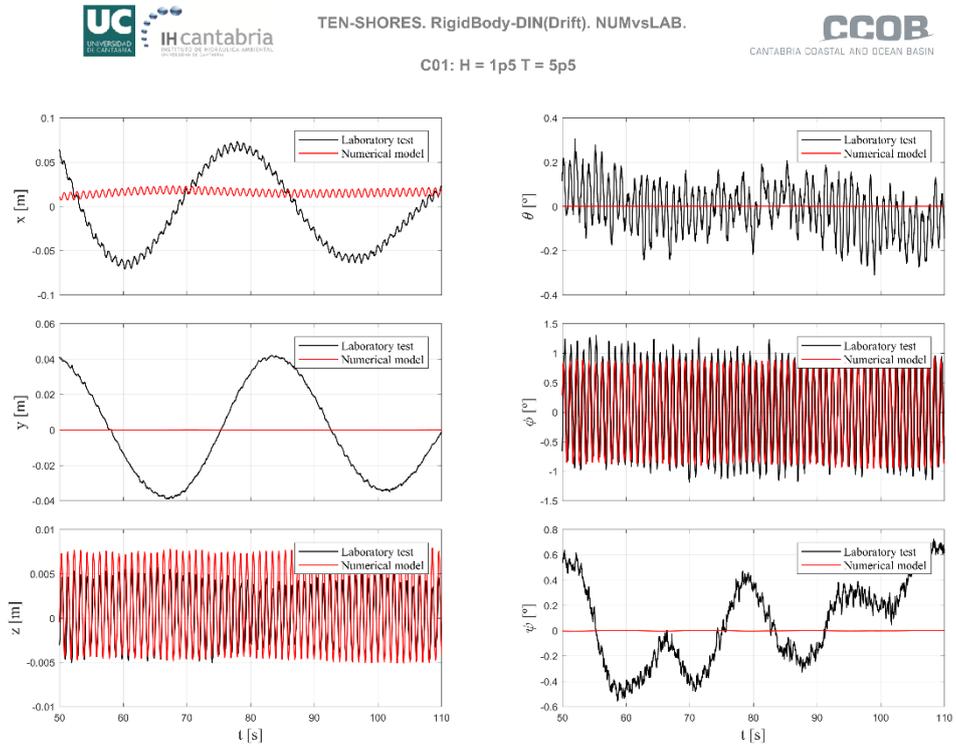


C03: H = 5p0 T = 19p0

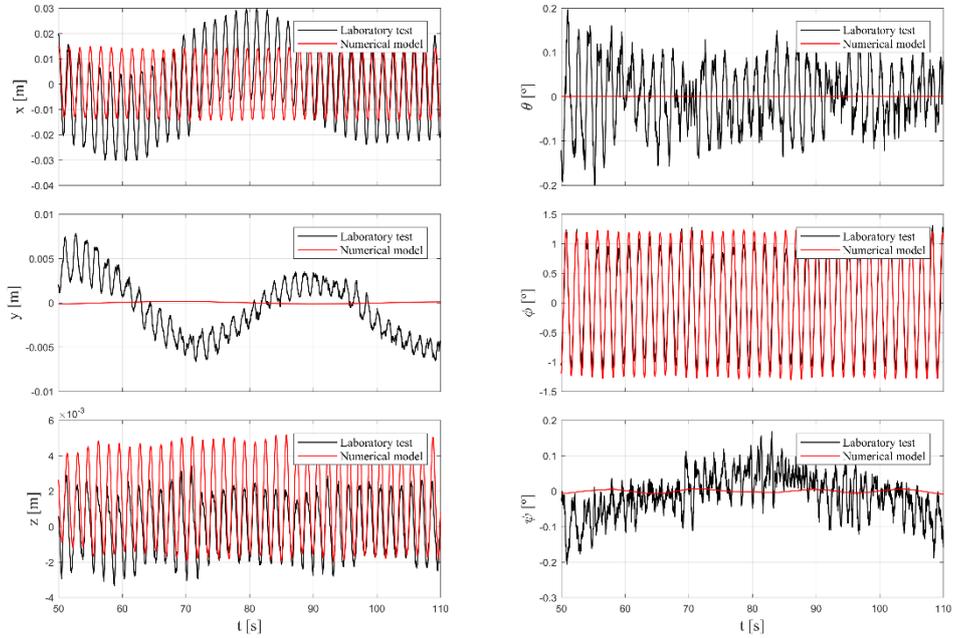


3.1.2. Sólido rígido Dinámico

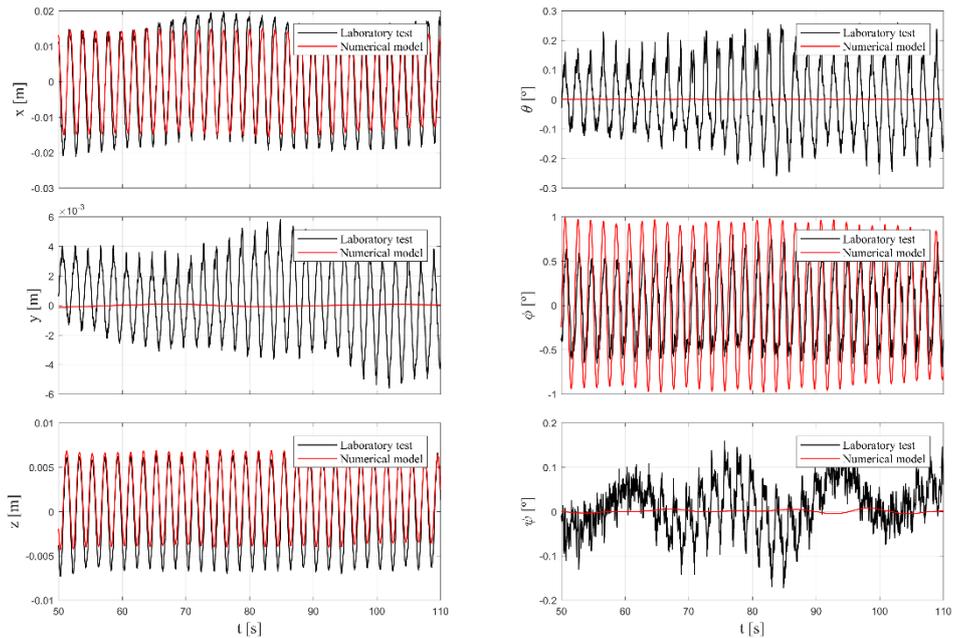
3.1.2.1. Configuración C01



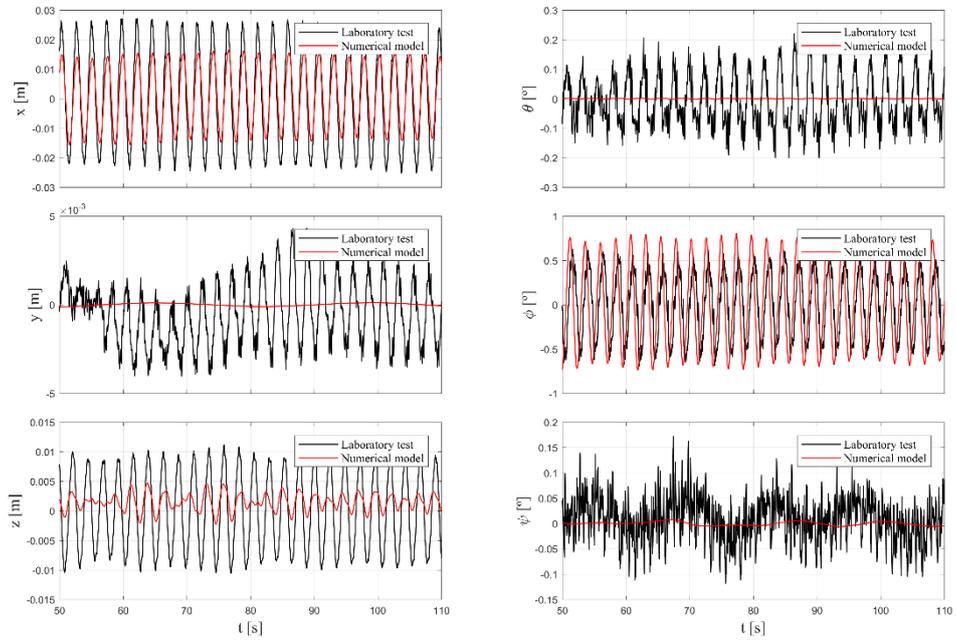
C01: $H = 1p5$ $T = 9p0$



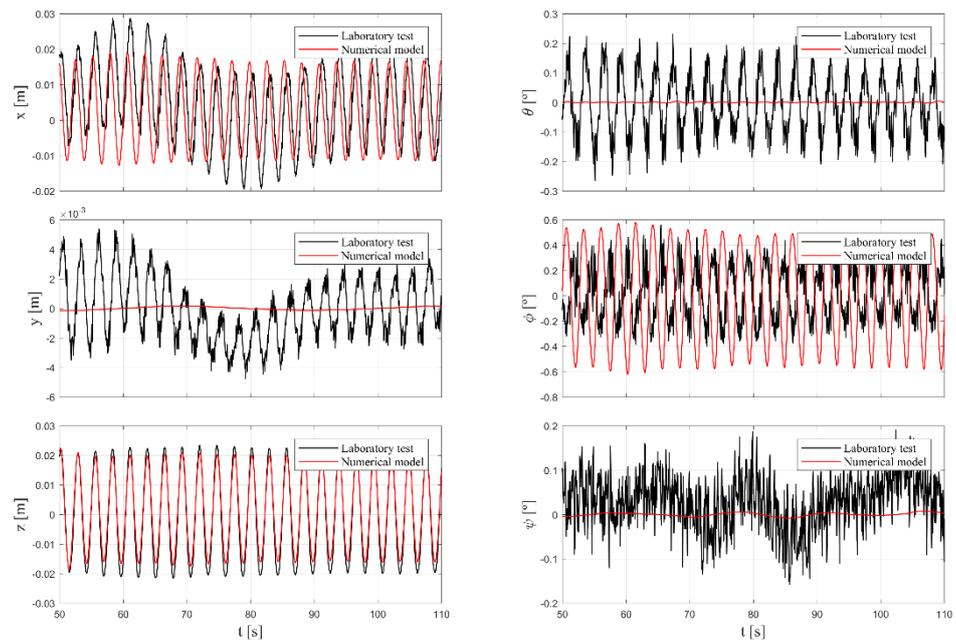
C01: $H = 1p5$ $T = 11p0$



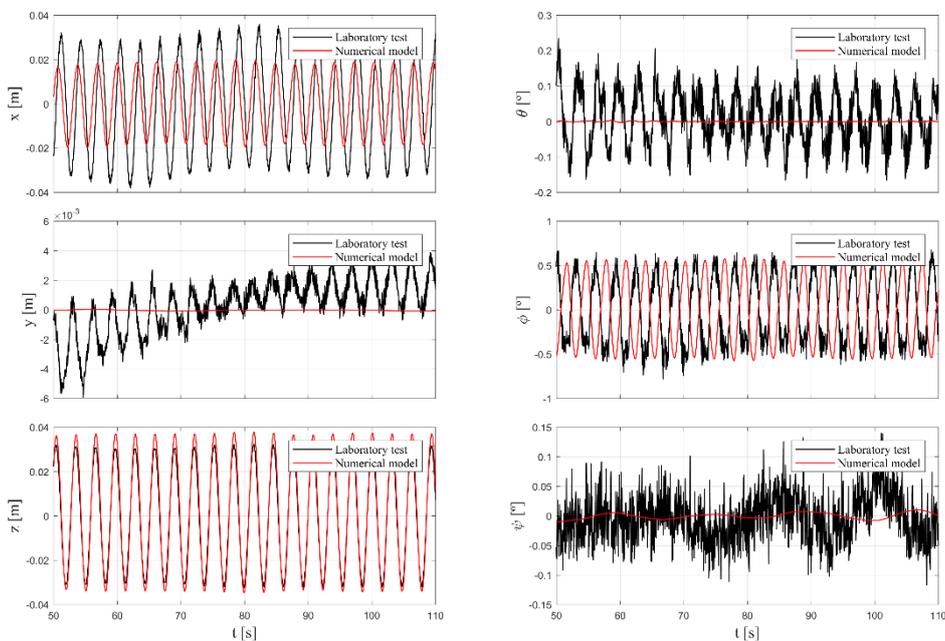
C01: H = 1p5 T = 13p0



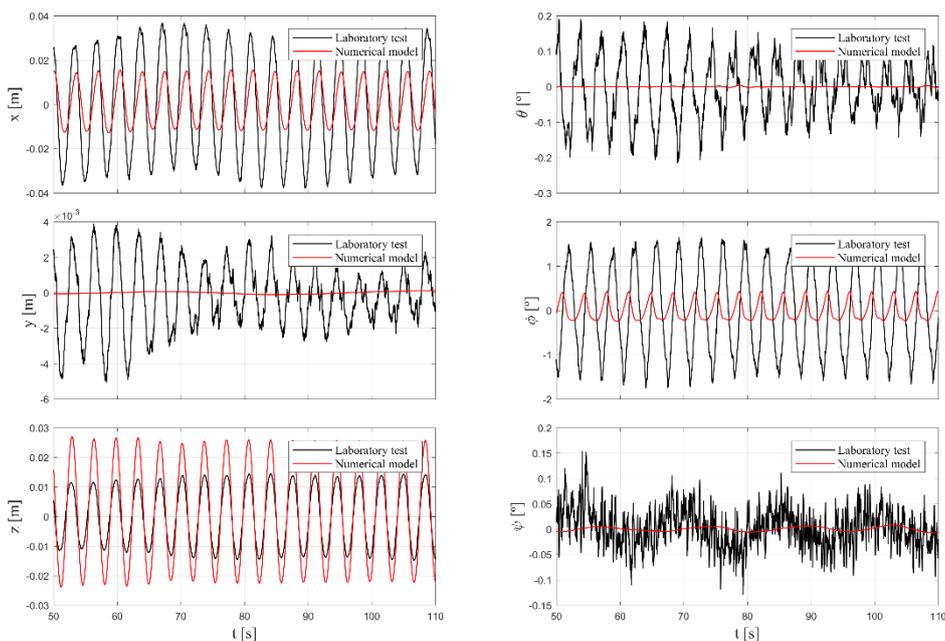
C01: H = 1p5 T = 15p0



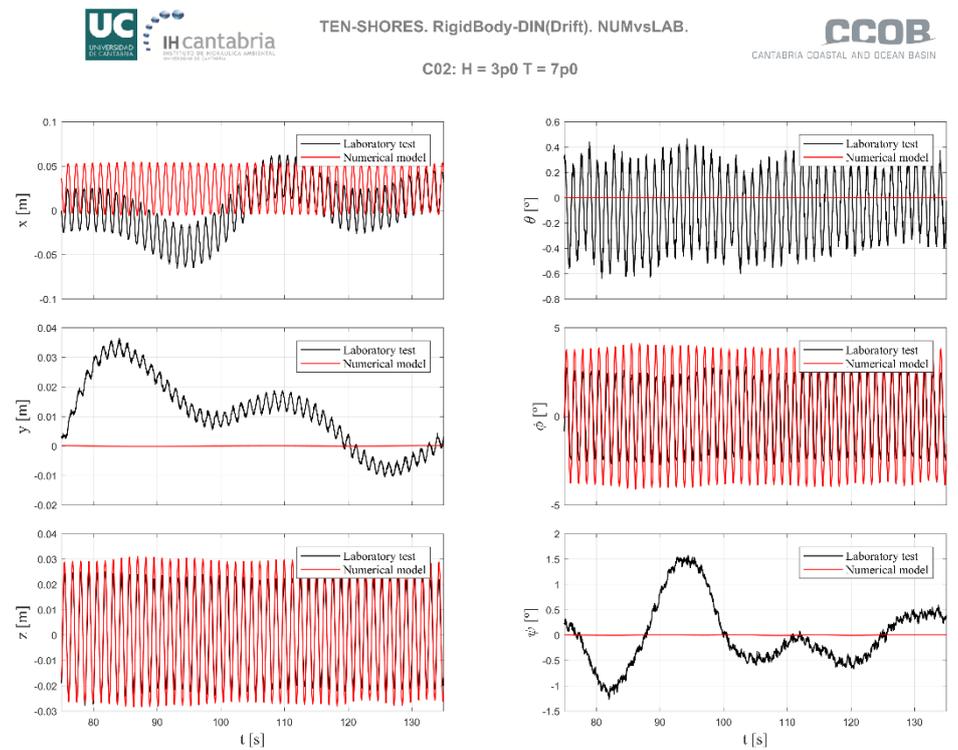
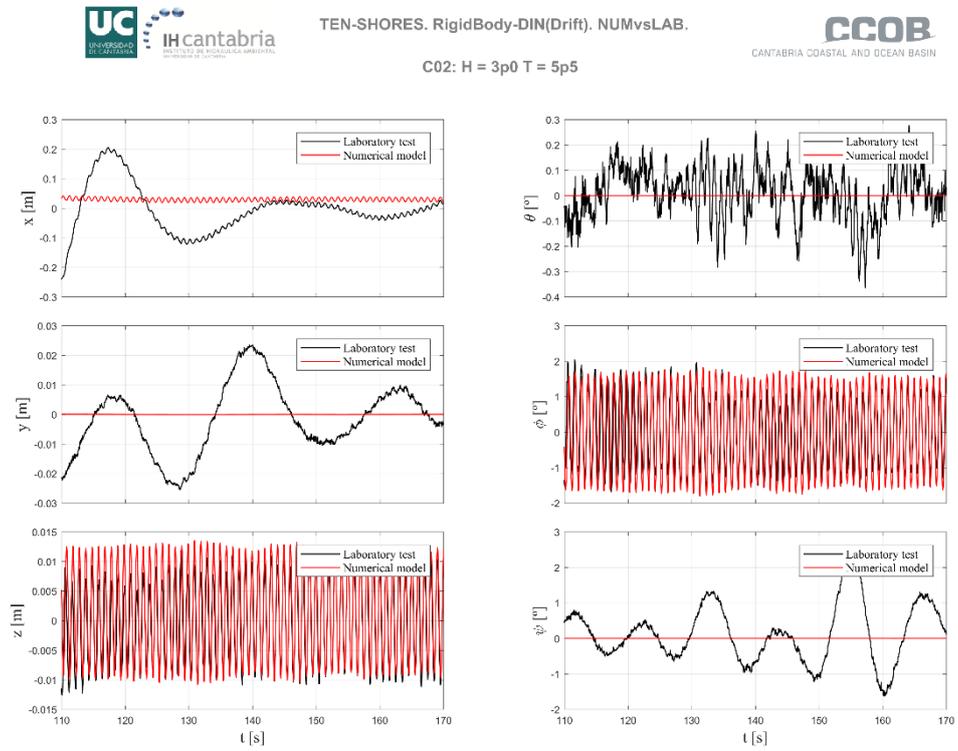
C01: H = 1p5 T = 17p0



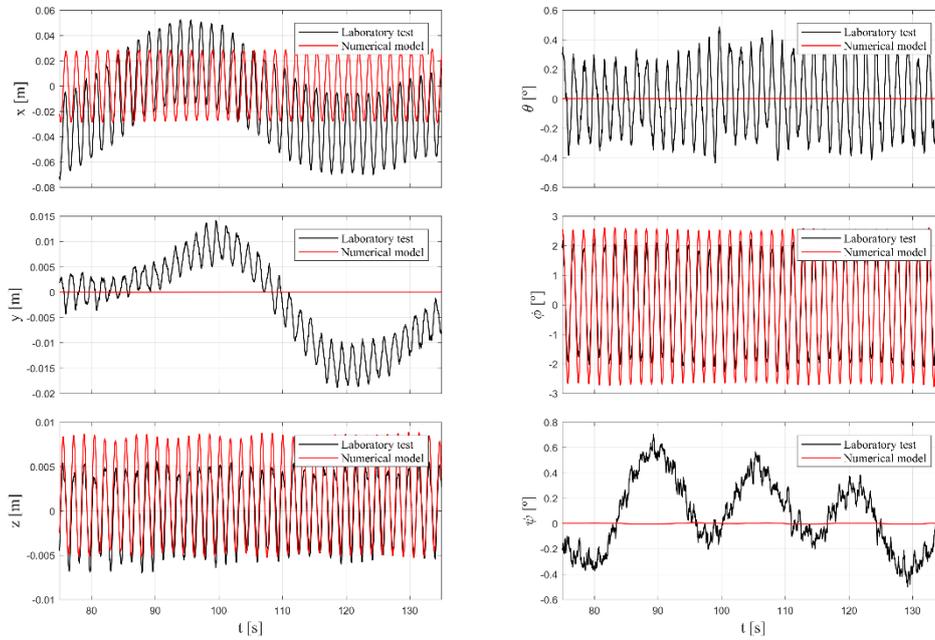
C01: H = 1p5 T = 19p0



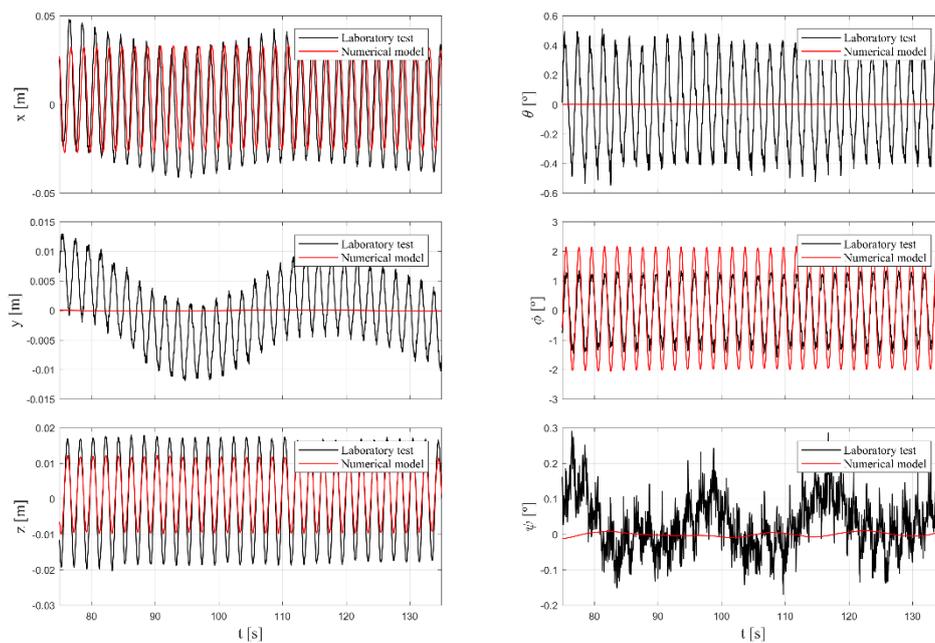
3.1.2.2. Configuración C02



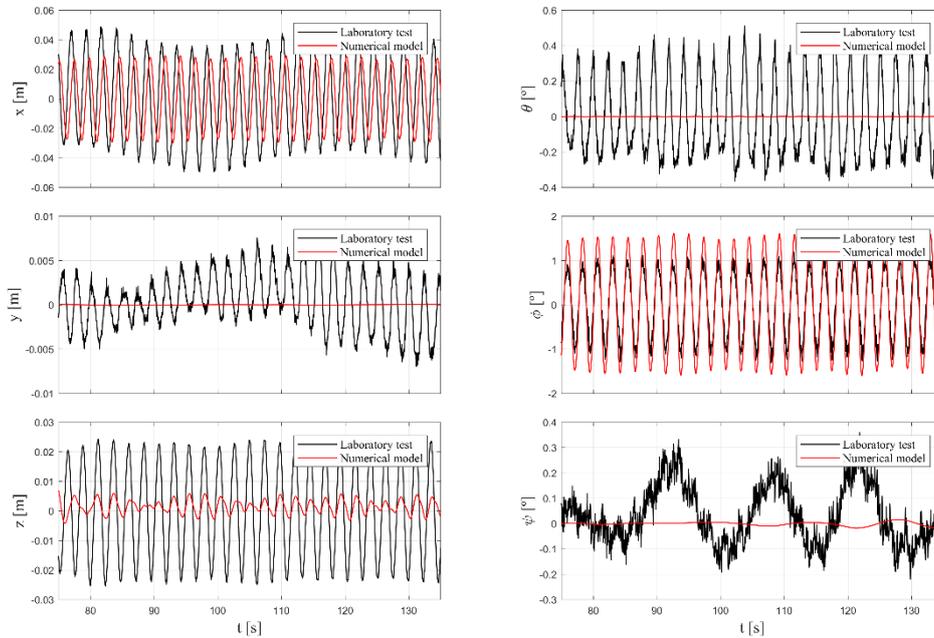
C02: $H = 3p_0$ $T = 9p_0$



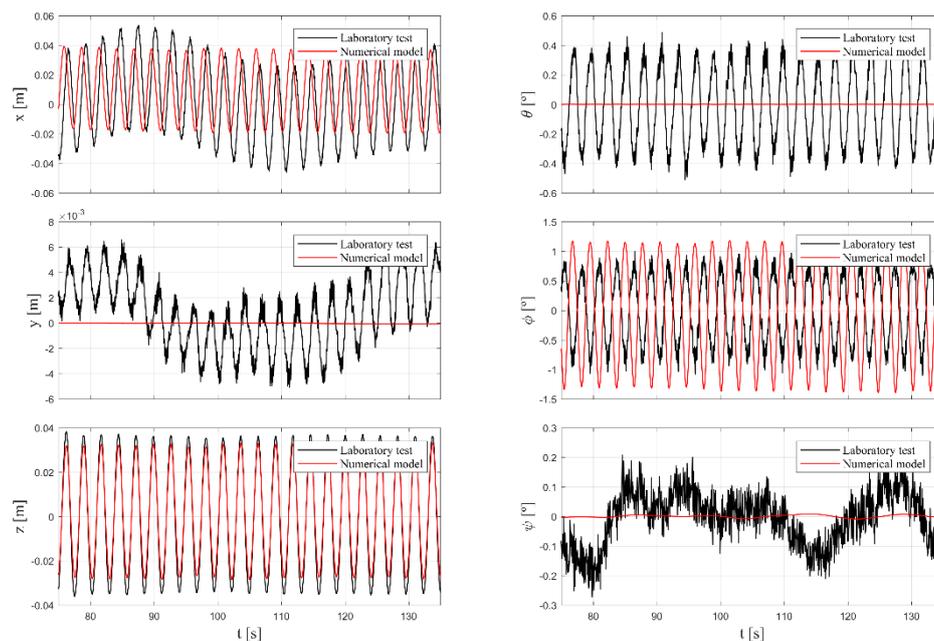
C02: $H = 3p_0$ $T = 11p_0$



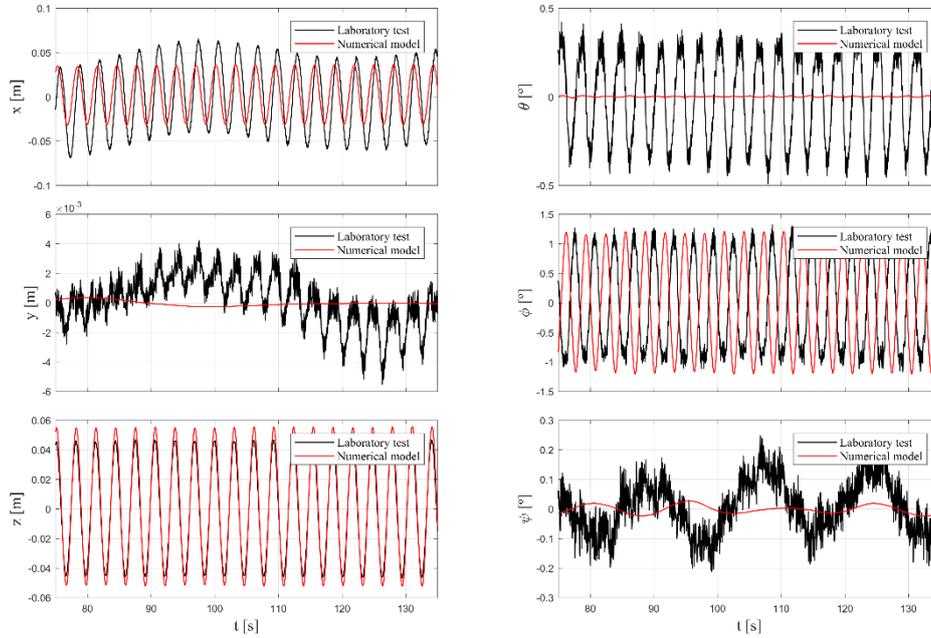
C02: $H = 3p0$ $T = 13p0$



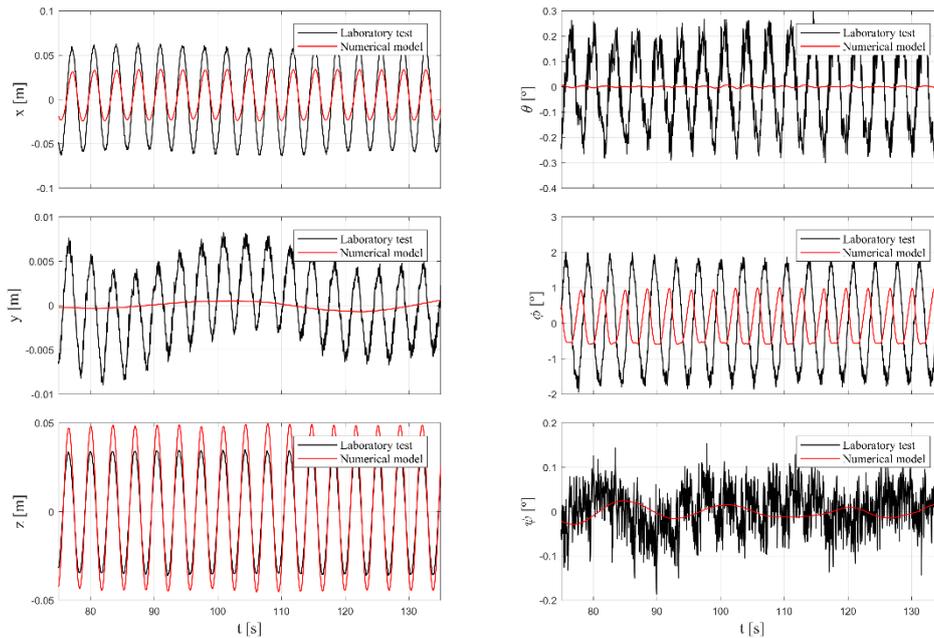
C02: $H = 3p0$ $T = 15p0$



C02: H = 3p0 T = 17p0

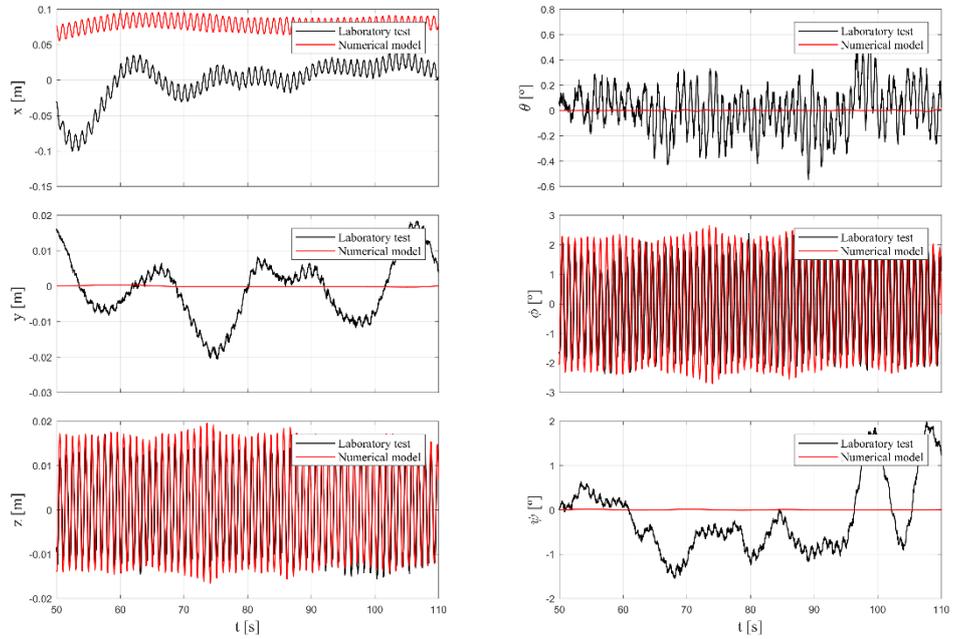


C02: H = 3p0 T = 19p0

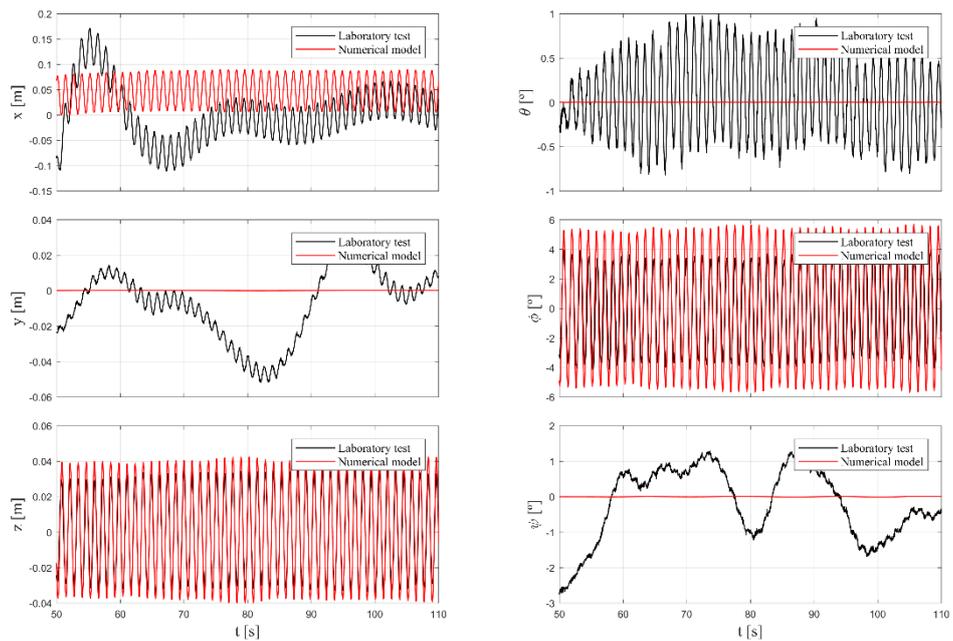


3.1.2.3. Configuración C03

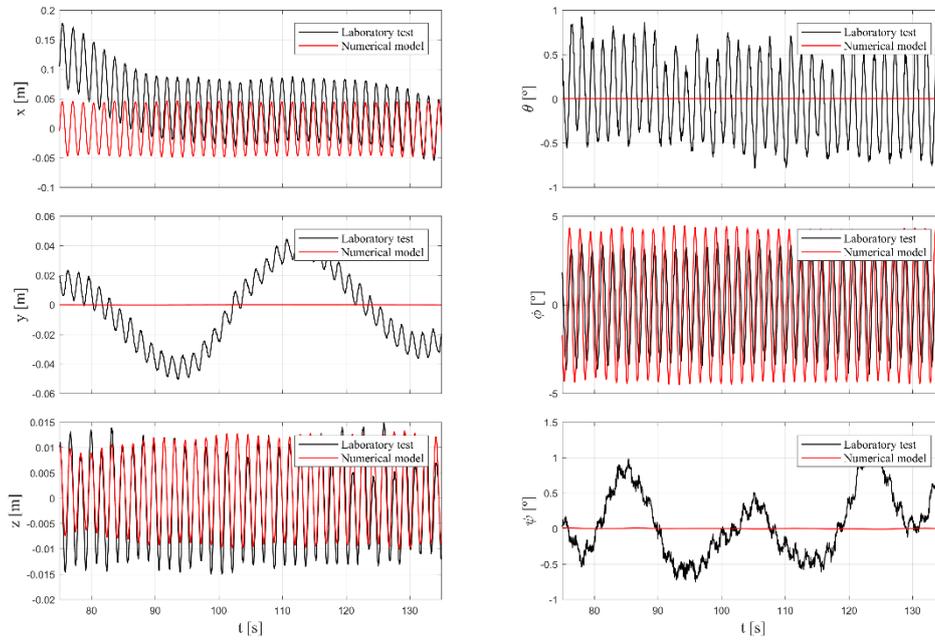
C03: H = 5p0 T = 5p5



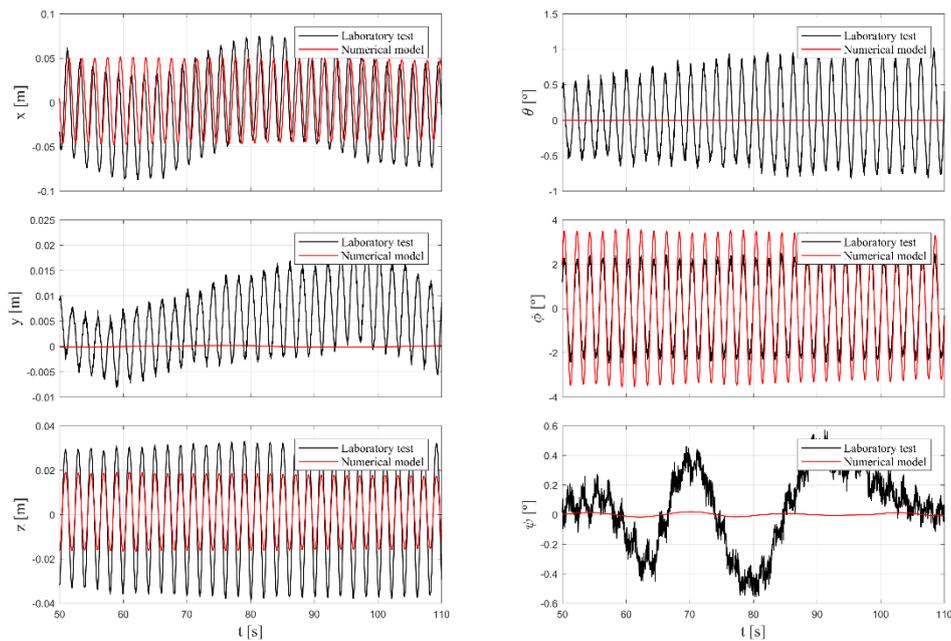
C03: H = 5p0 T = 7p0



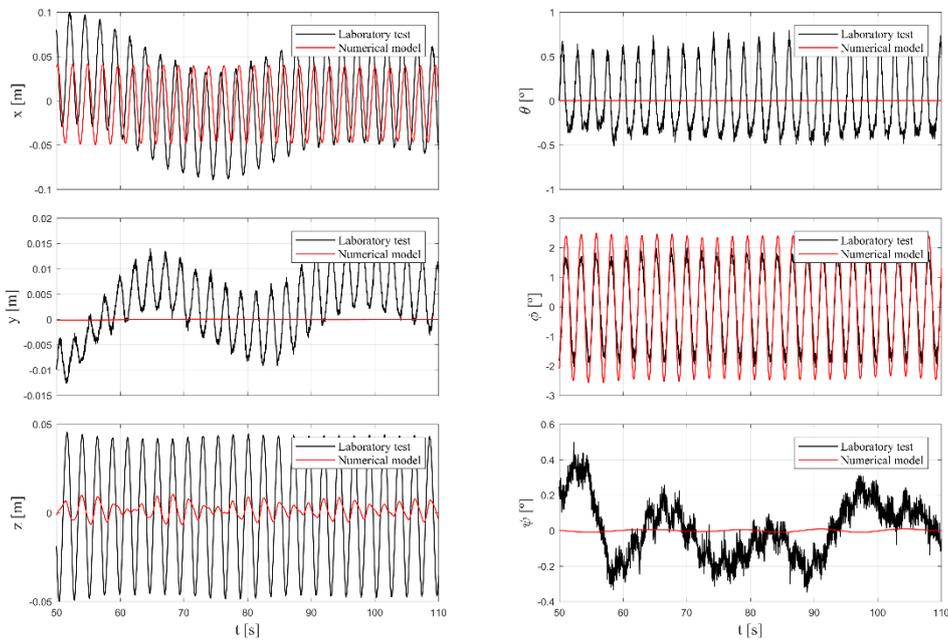
C03: H = 5p0 T = 9p0



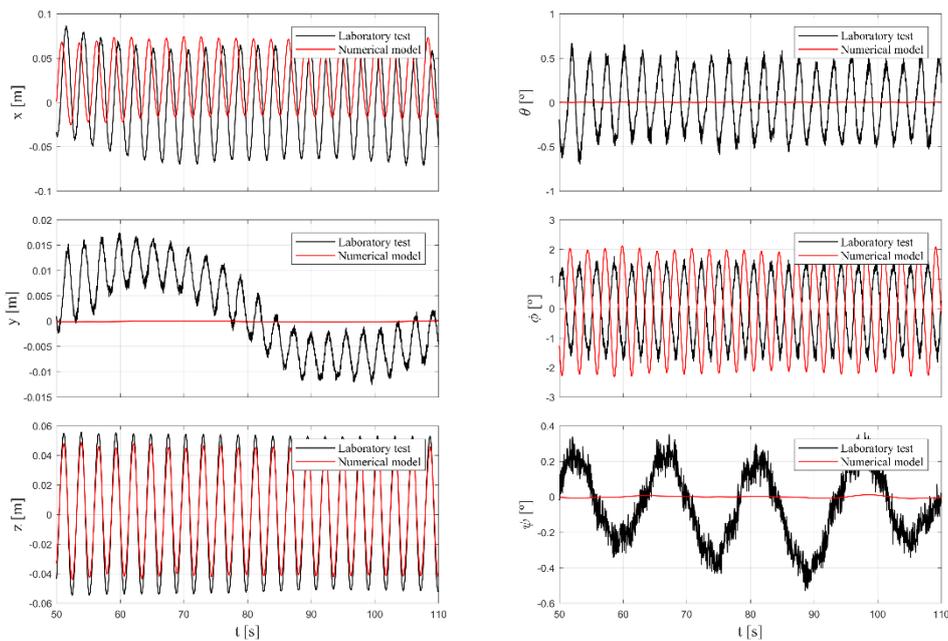
C03: H = 5p0 T = 11p0



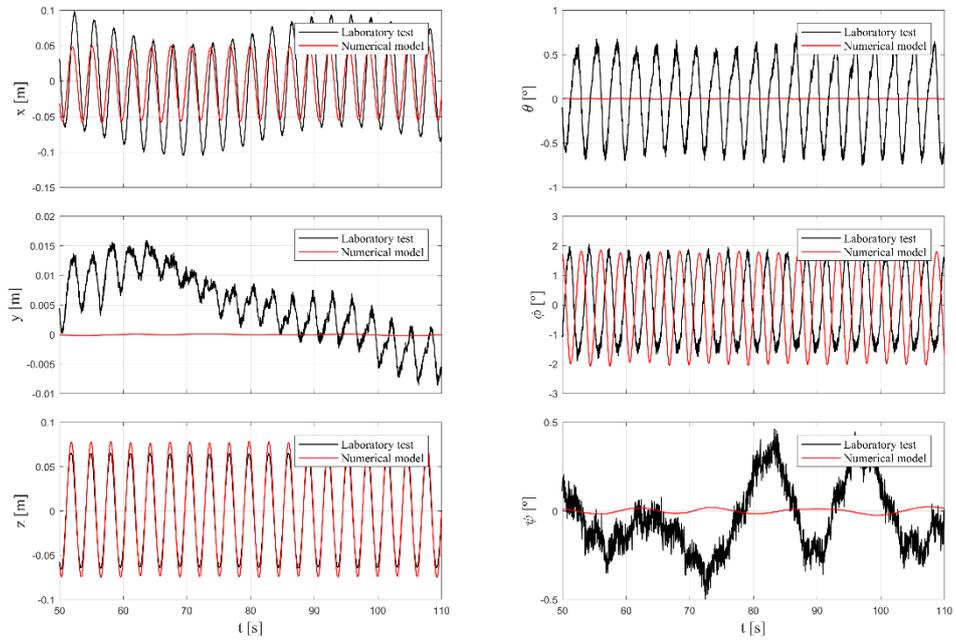
C03: $H = 5p_0$ $T = 13p_0$



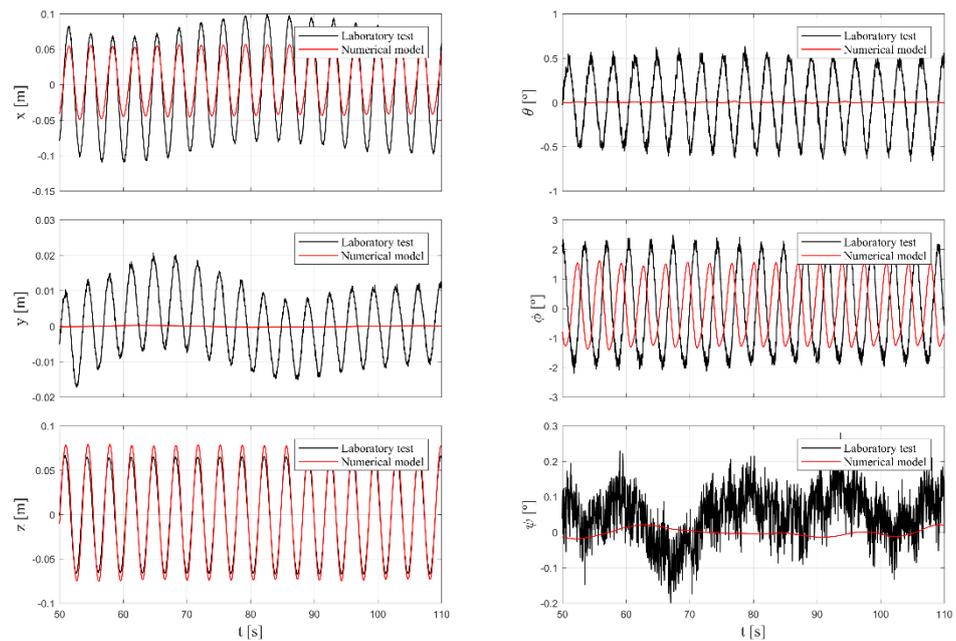
C03: $H = 5p_0$ $T = 15p_0$



C03: H = 5p0 T = 17p0



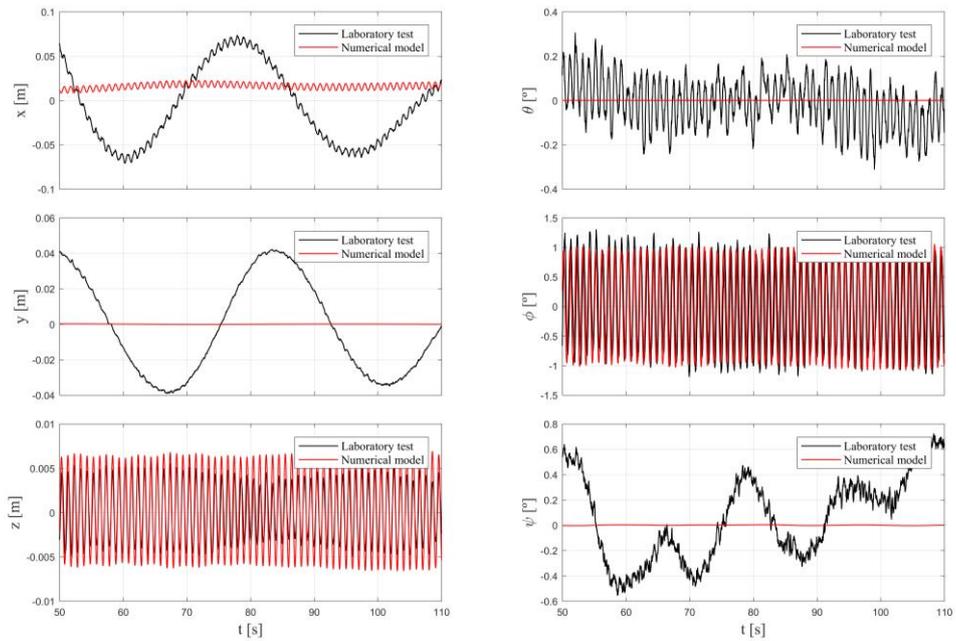
C03: H = 5p0 T = 19p0



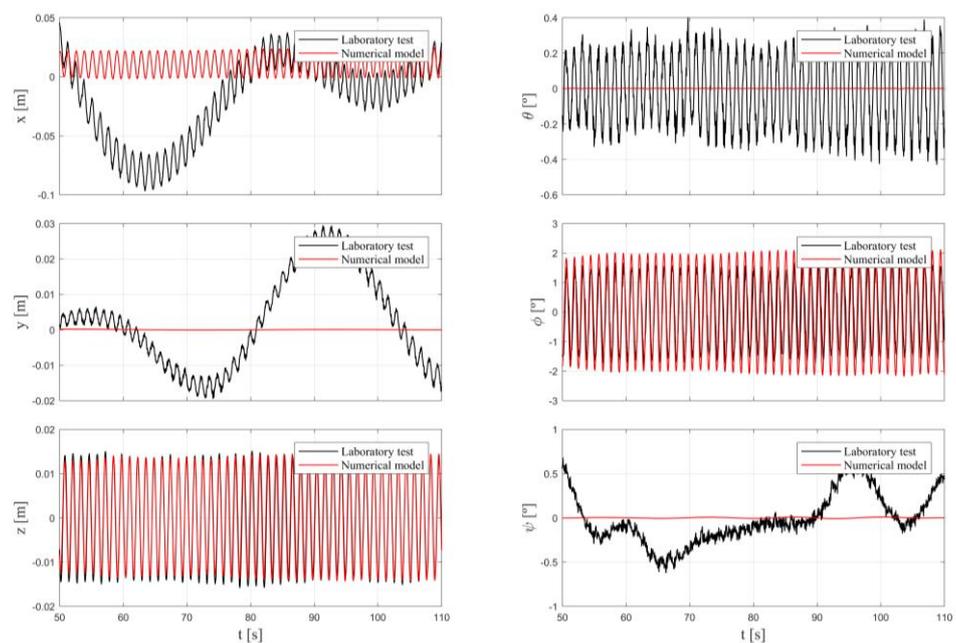
3.1.3. Multicuerpo Dinámico

3.1.3.1. Configuración C01

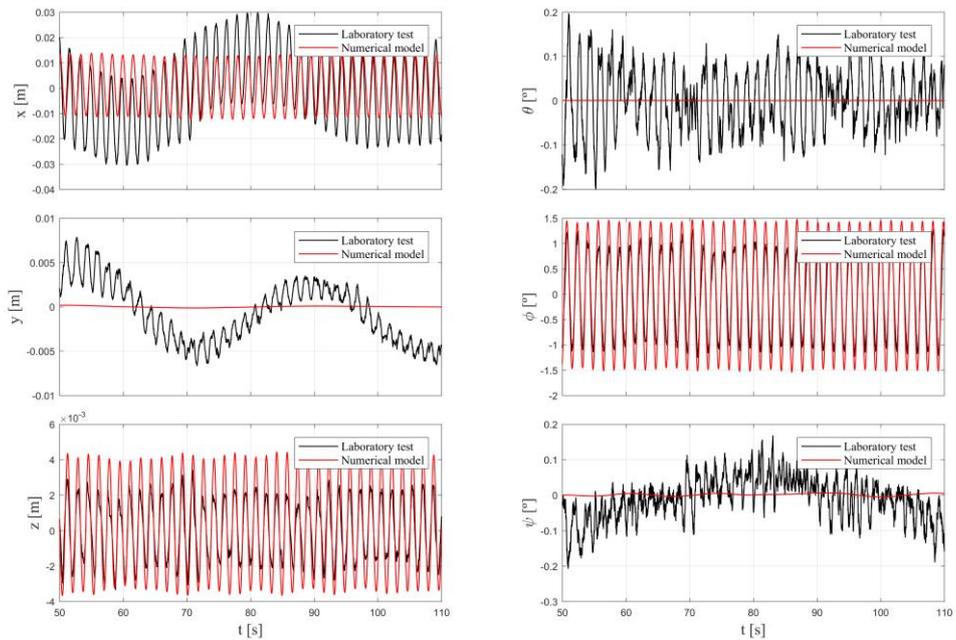
C01: H = 1p5 T = 5p5



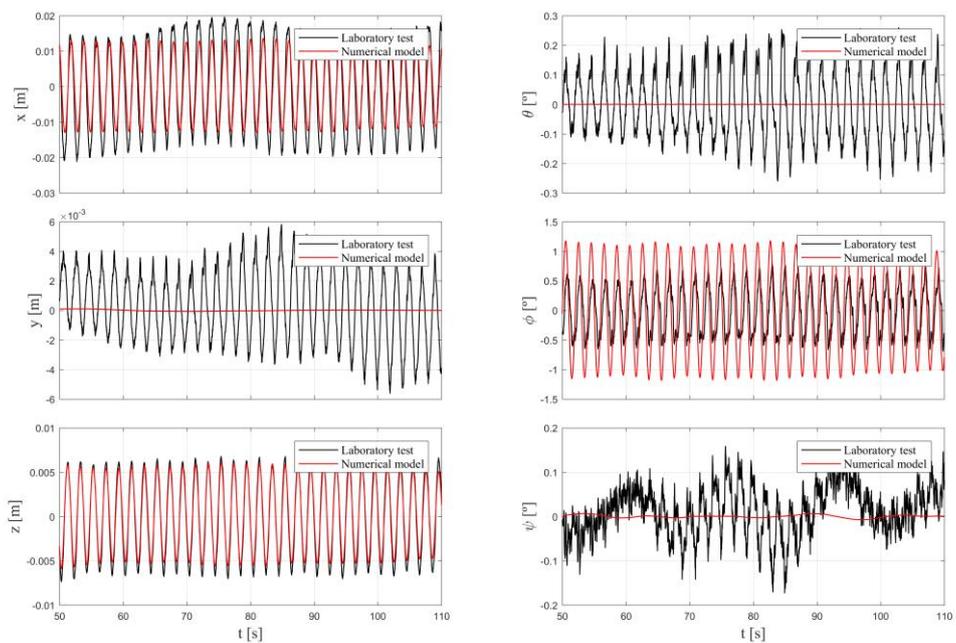
C01: H = 1p5 T = 7p0



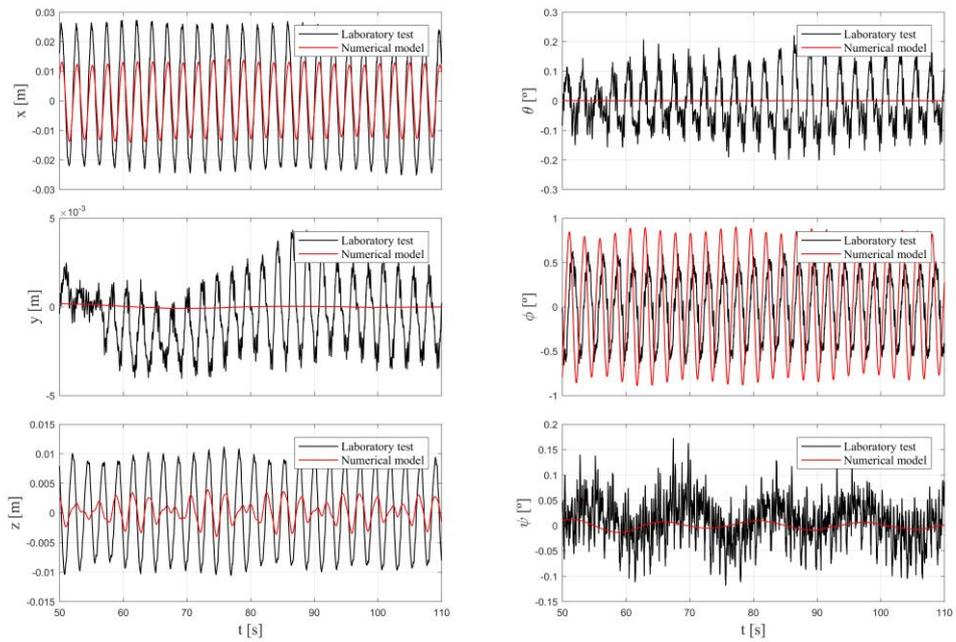
C01: $H = 1p5$ $T = 9p0$



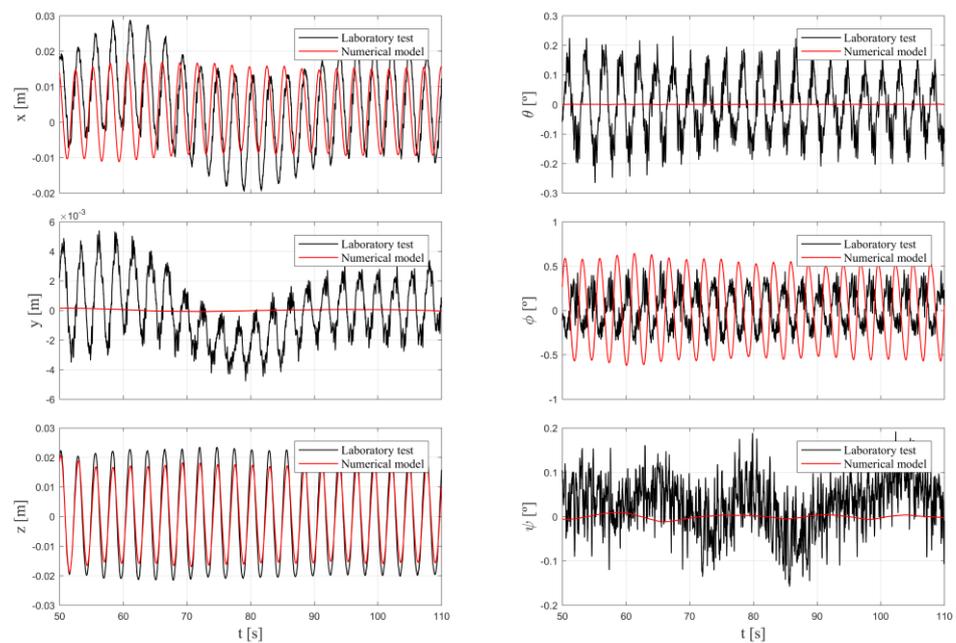
C01: $H = 1p5$ $T = 11p0$



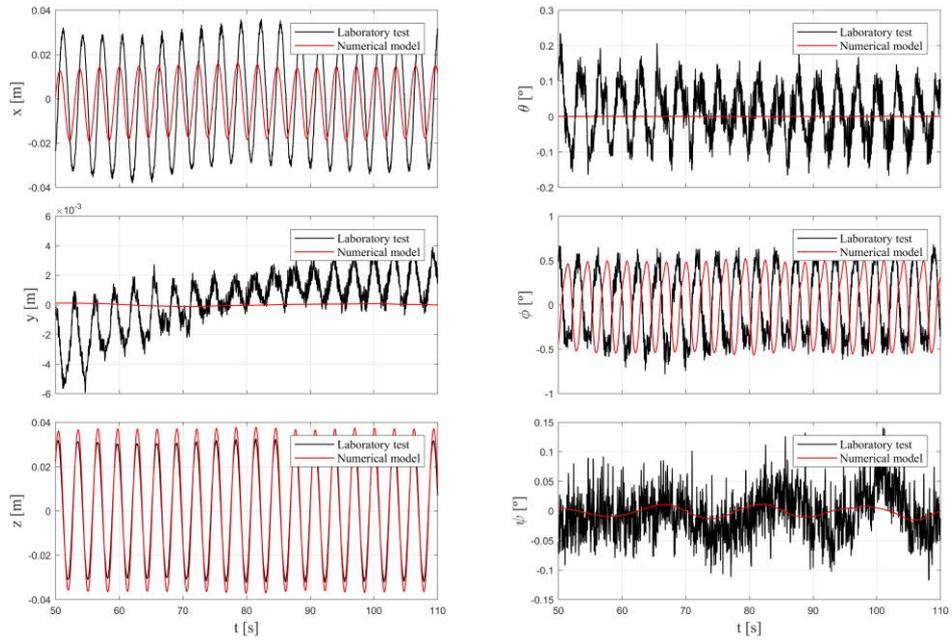
C01: H = 1p5 T = 13p0



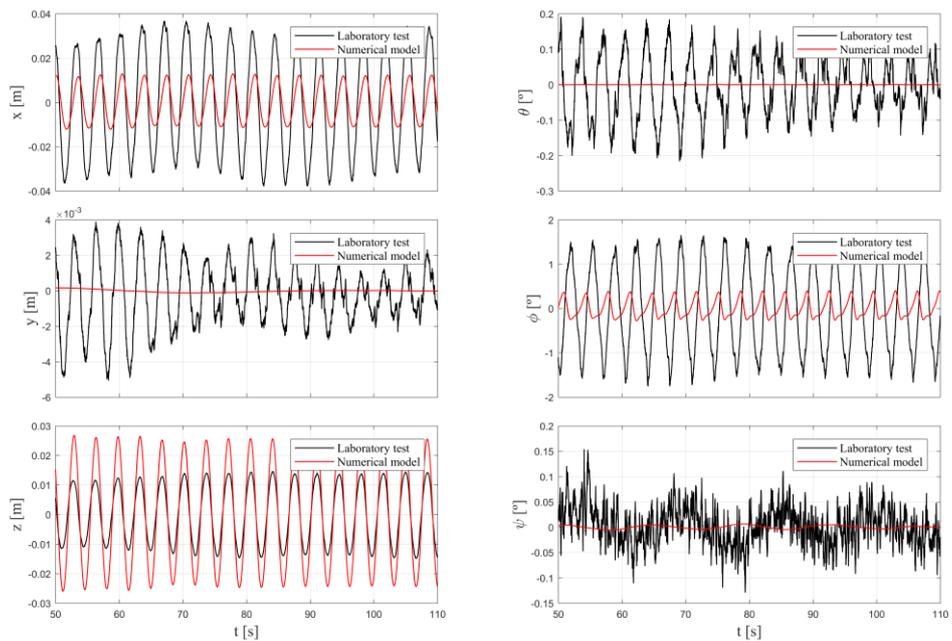
C01: H = 1p5 T = 15p0



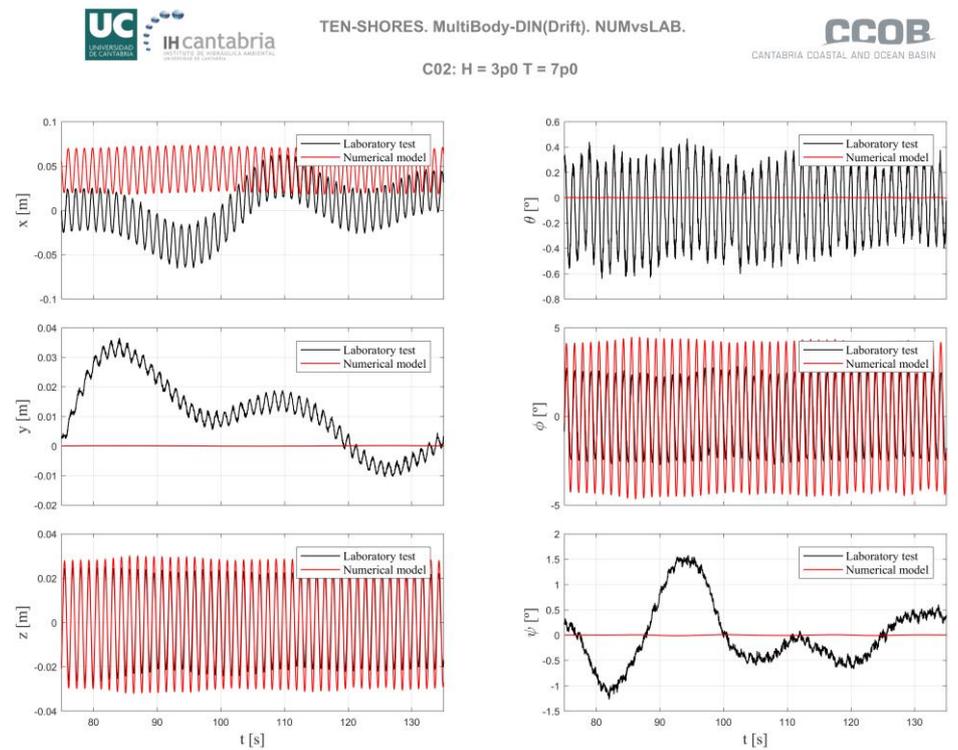
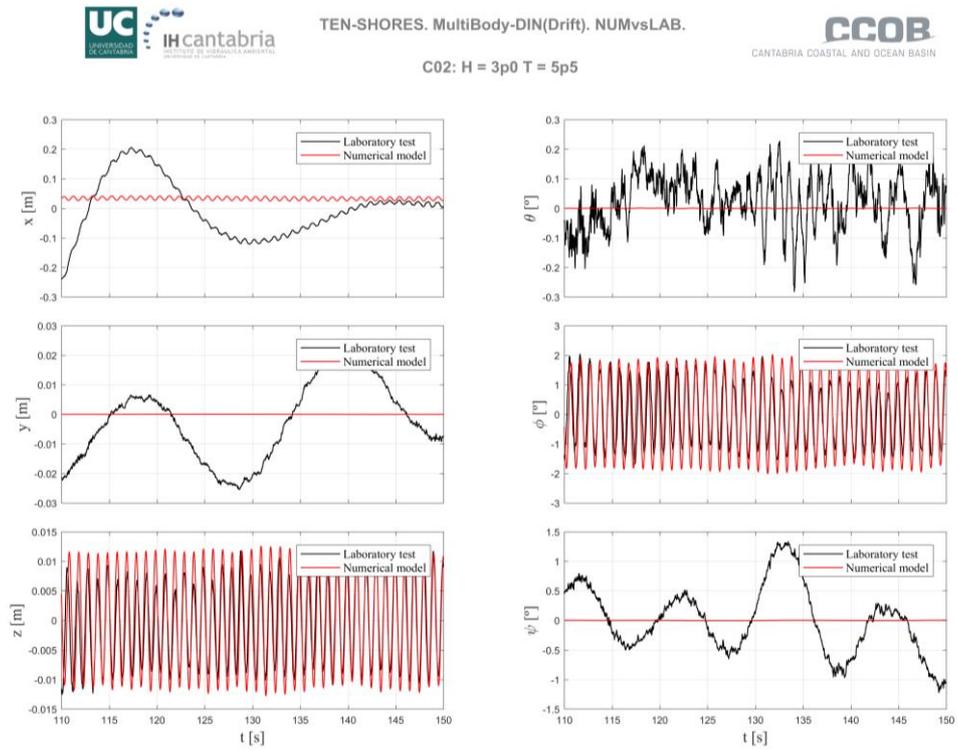
C01: H = 1p5 T = 17p0



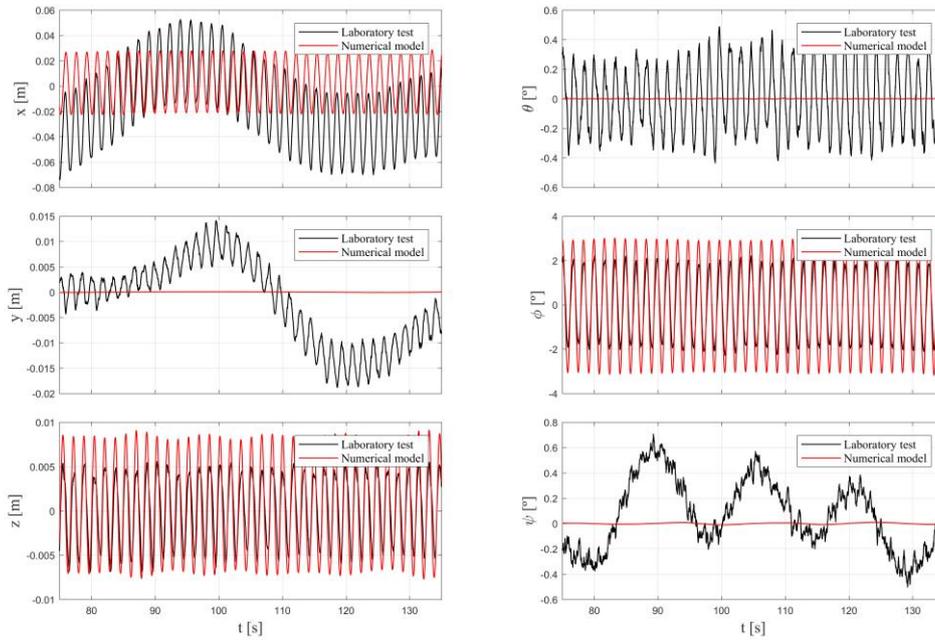
C01: H = 1p5 T = 19p0



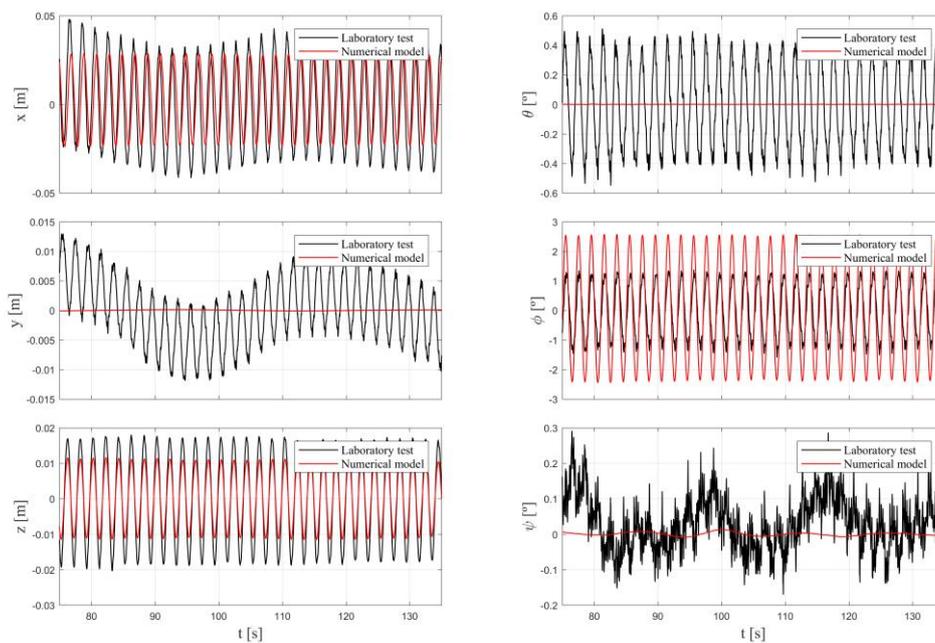
3.1.3.2. Configuración C02



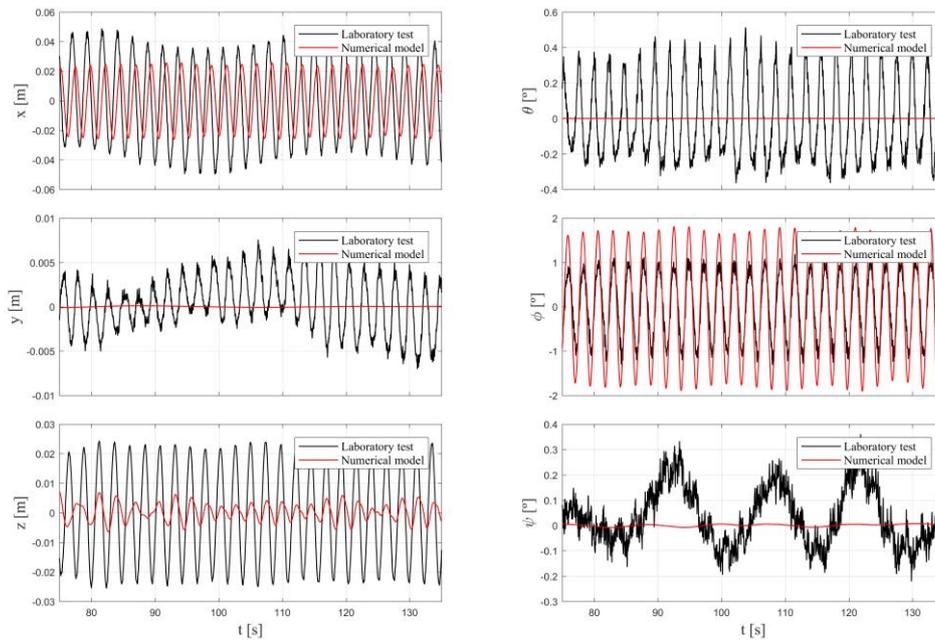
C02: $H = 3p0$ $T = 9p0$



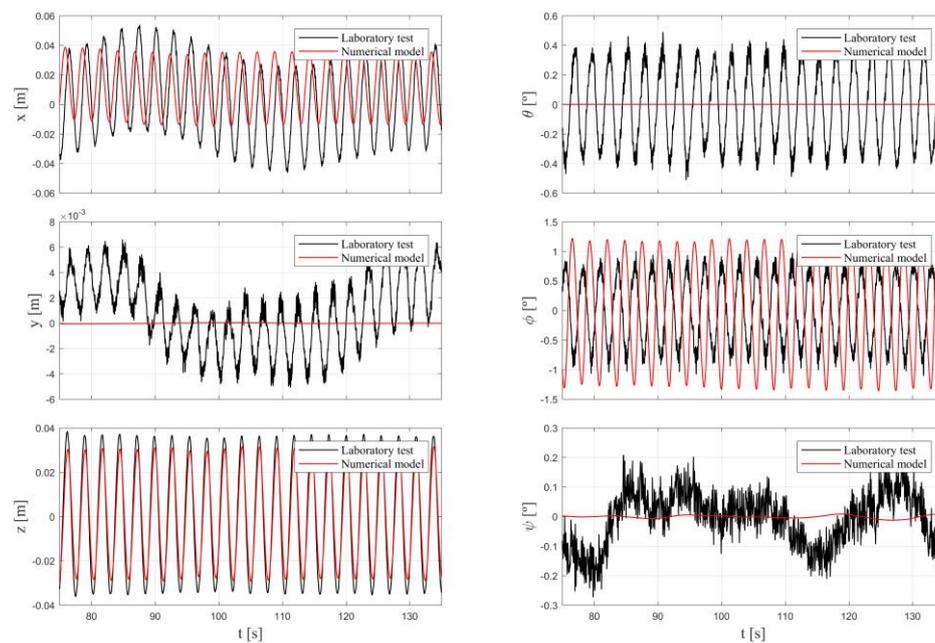
C02: $H = 3p0$ $T = 11p0$



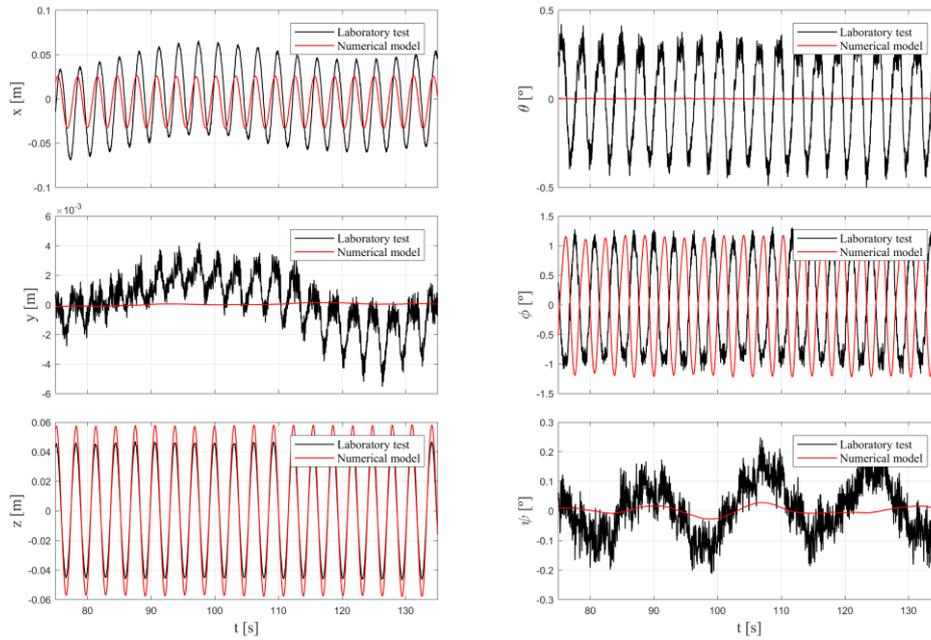
C02: H = 3p0 T = 13p0



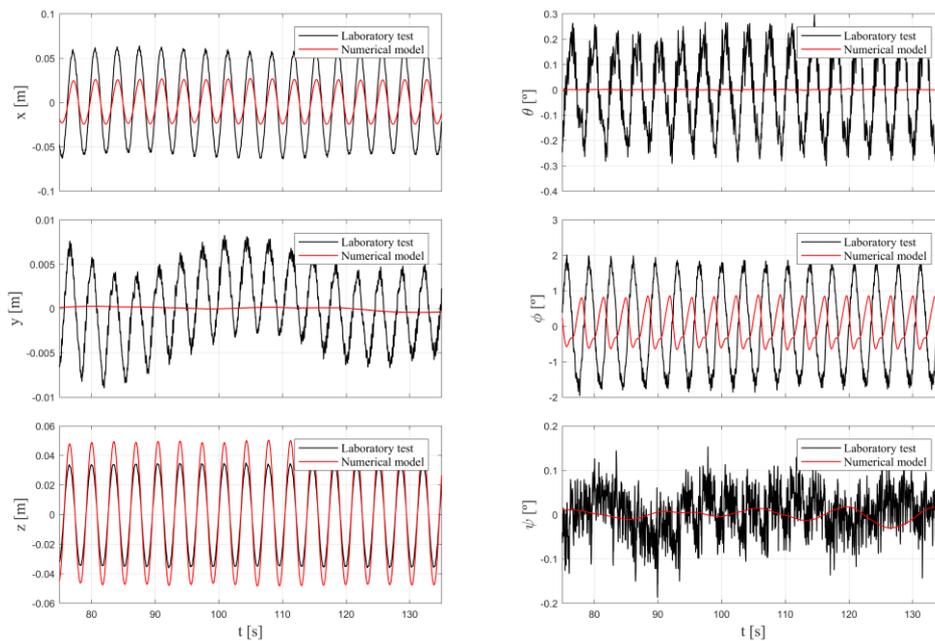
C02: H = 3p0 T = 15p0



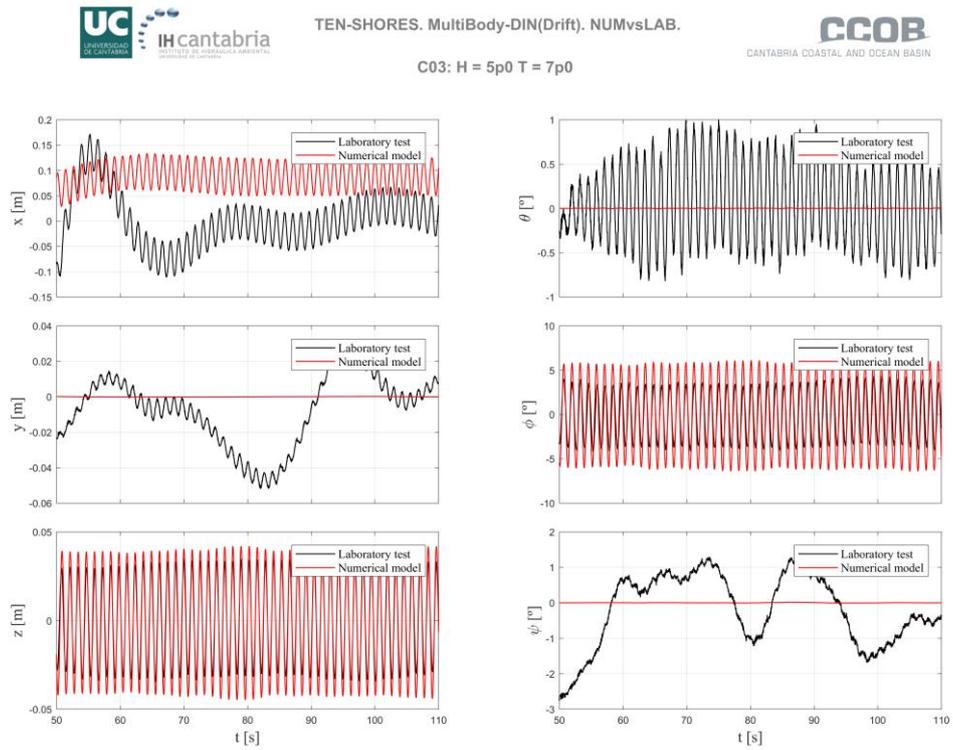
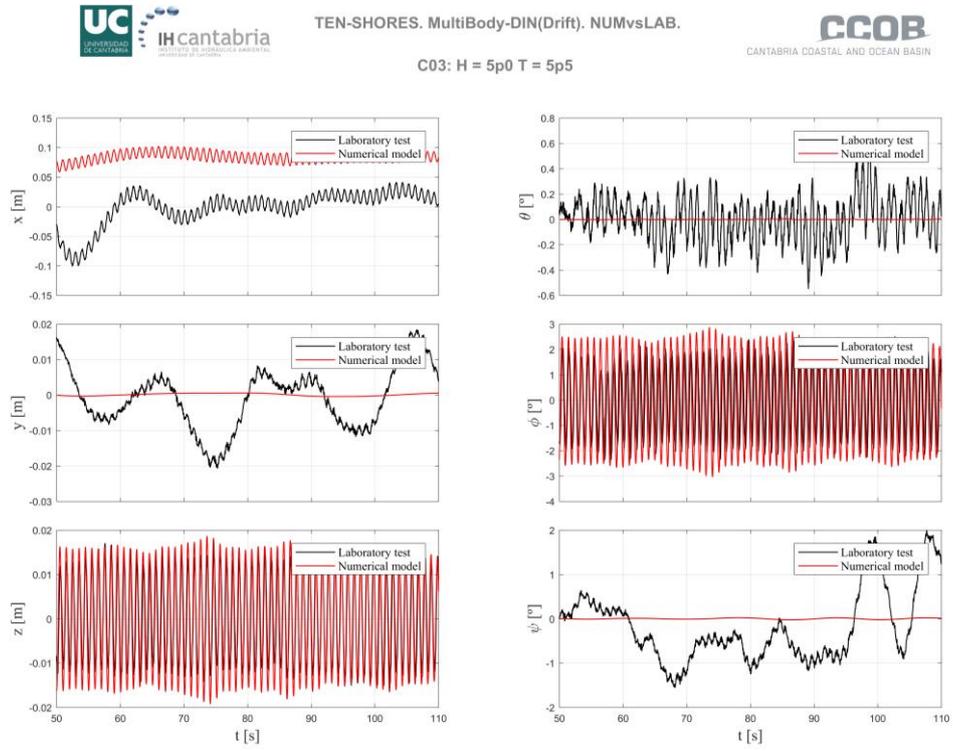
C02: H = 3p0 T = 17p0



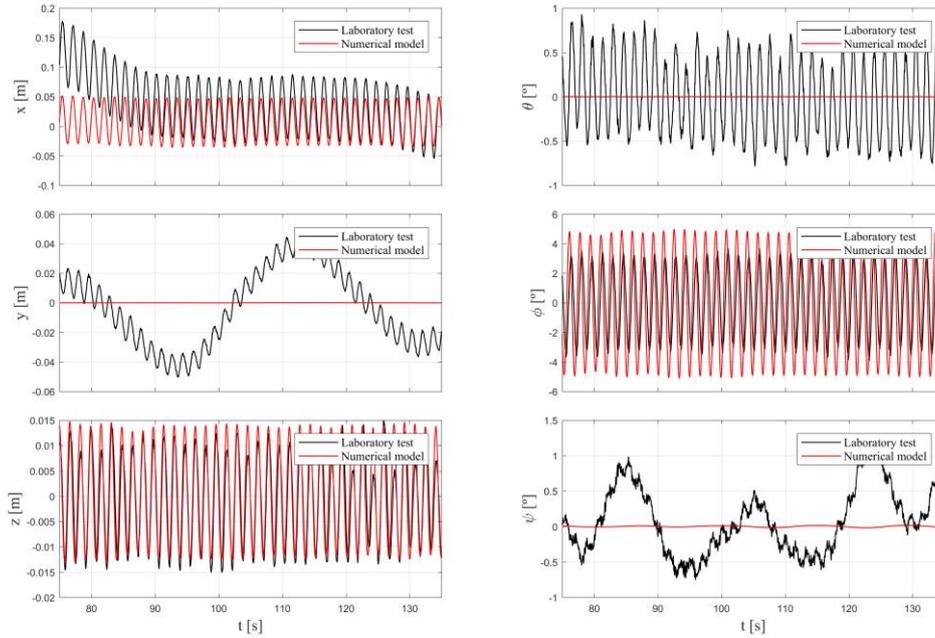
C02: H = 3p0 T = 19p0



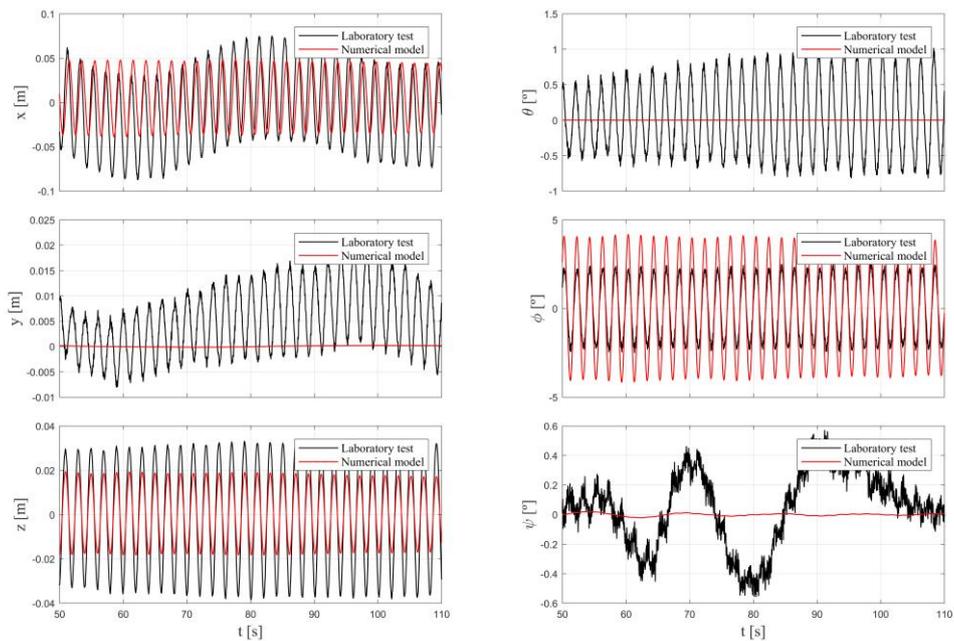
3.1.3.3. Configuración C03



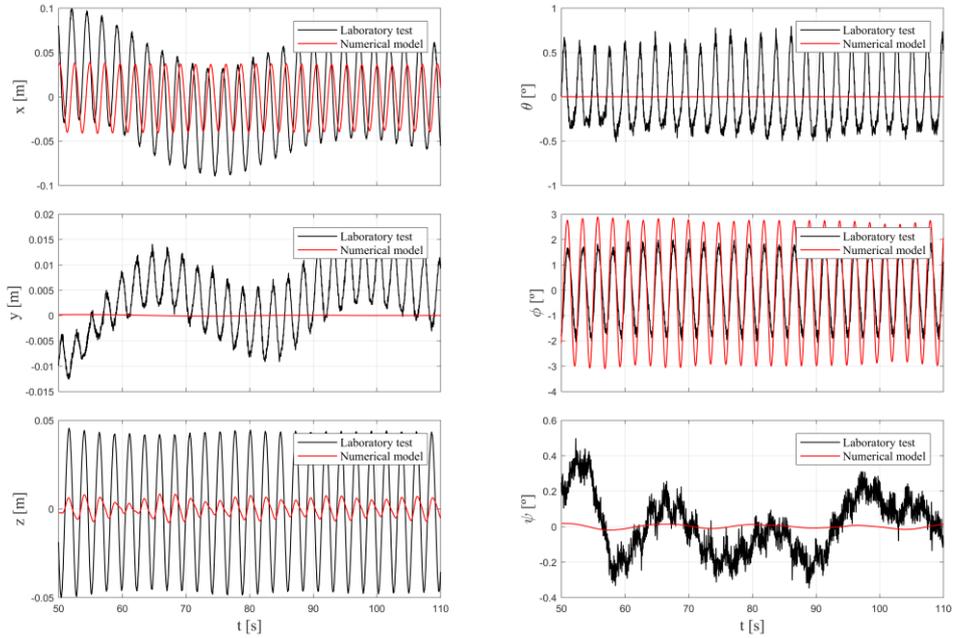
C03: H = 5p0 T = 9p0



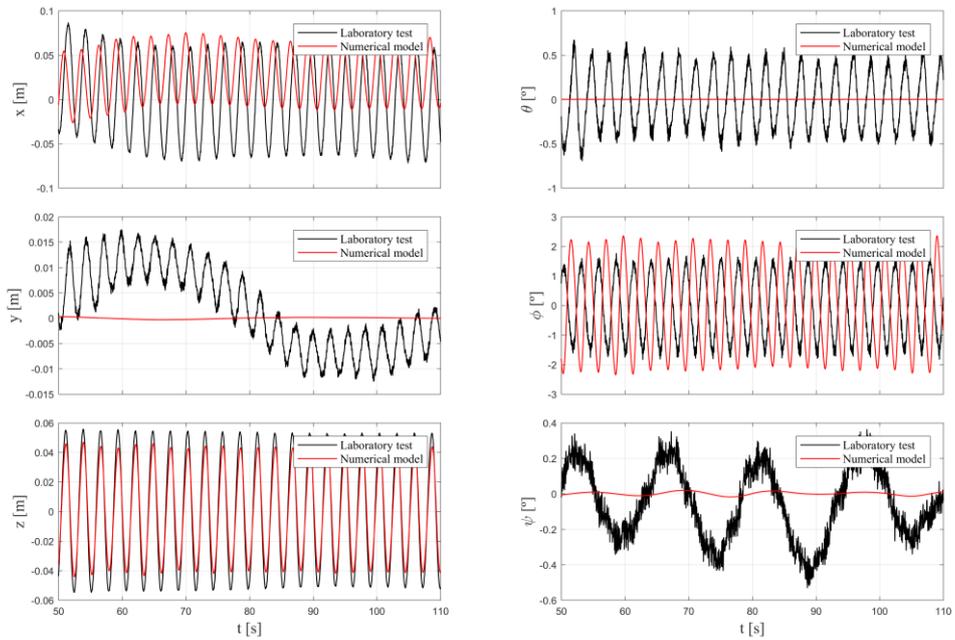
C03: H = 5p0 T = 11p0



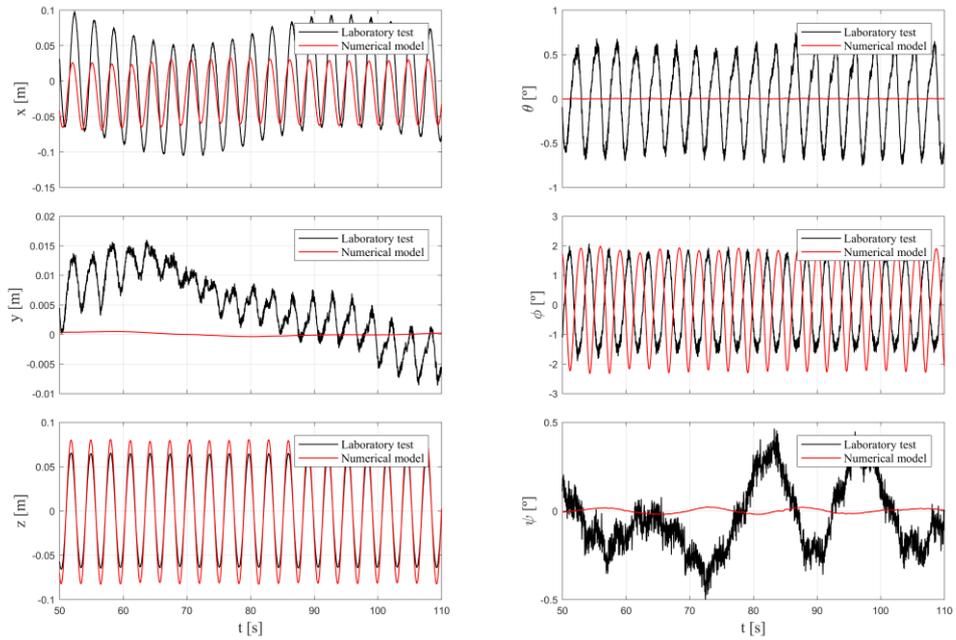
C03: H = 5p0 T = 13p0



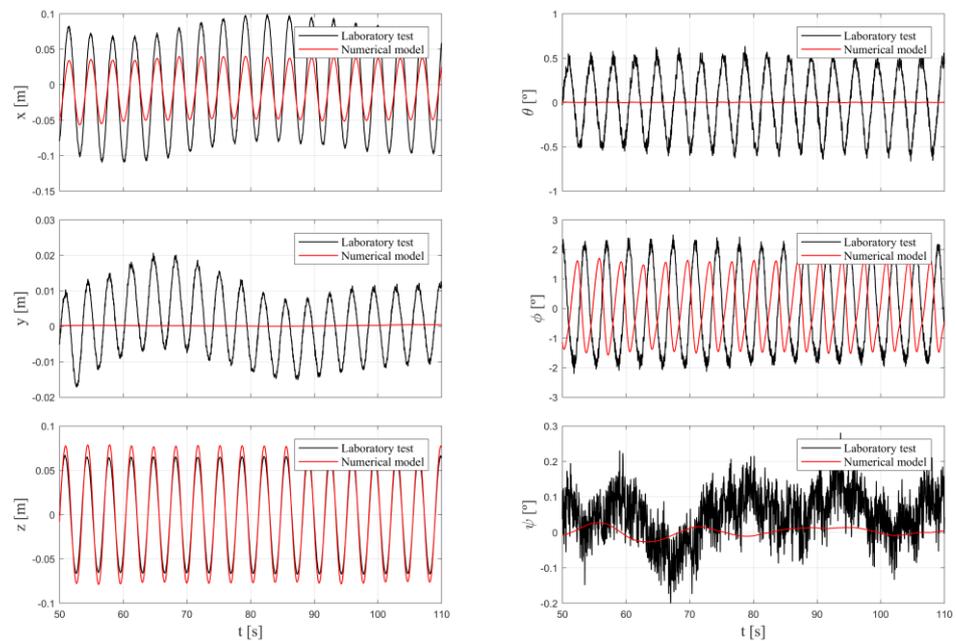
C03: H = 5p0 T = 15p0



C03: H = 5p0 T = 17p0



C03: H = 5p0 T = 19p0



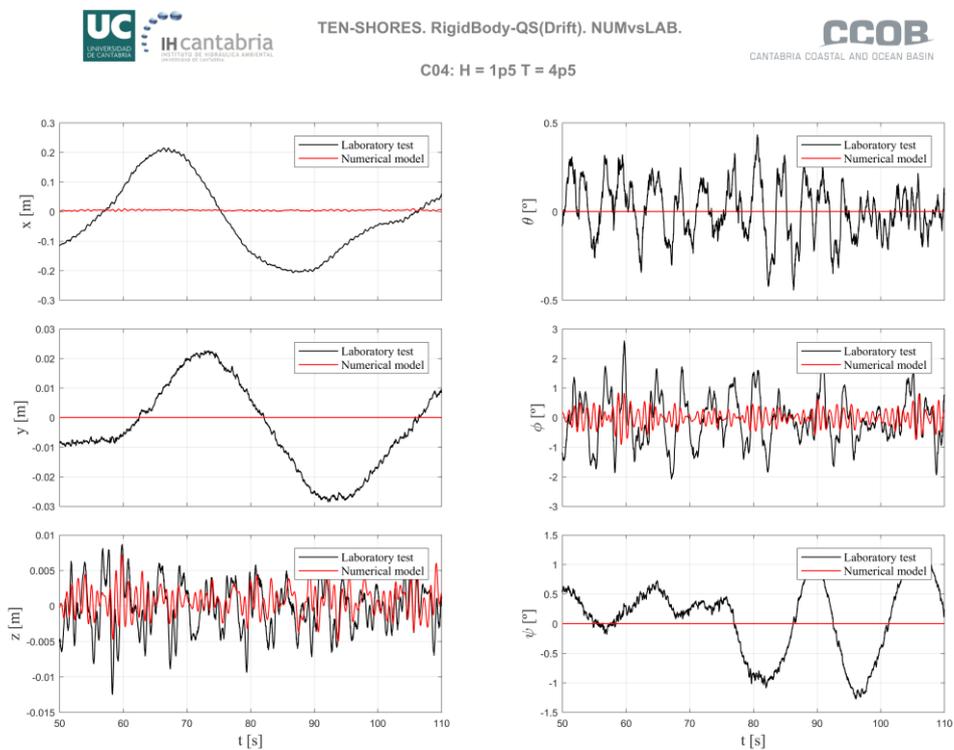
4. Resultados de Oleaje Irregular

En este apartado se presentan todas las series temporales de movimientos de todos los GdL para cada una de las dos configuraciones de oleaje irregular C04 y C05.

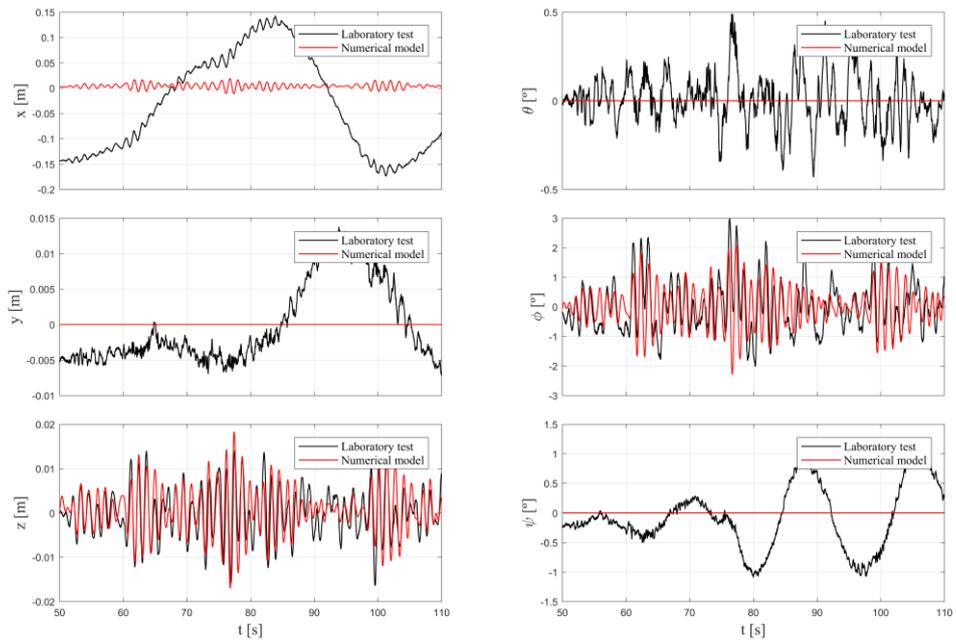
4.1. Series temporales de movimientos

4.1.1. Sólido rígido Cuasiestático

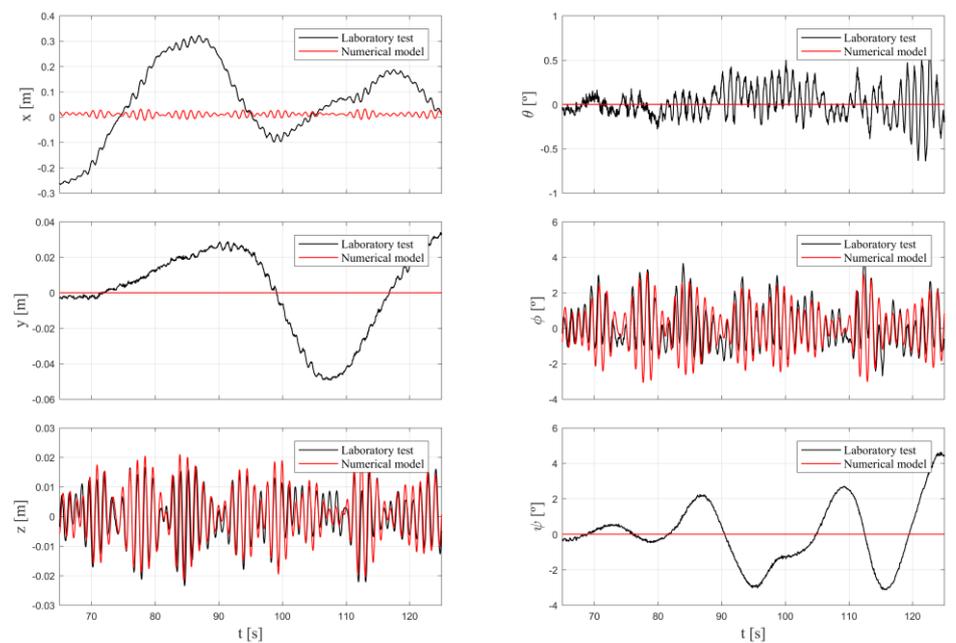
4.1.1.1. Configuración C04



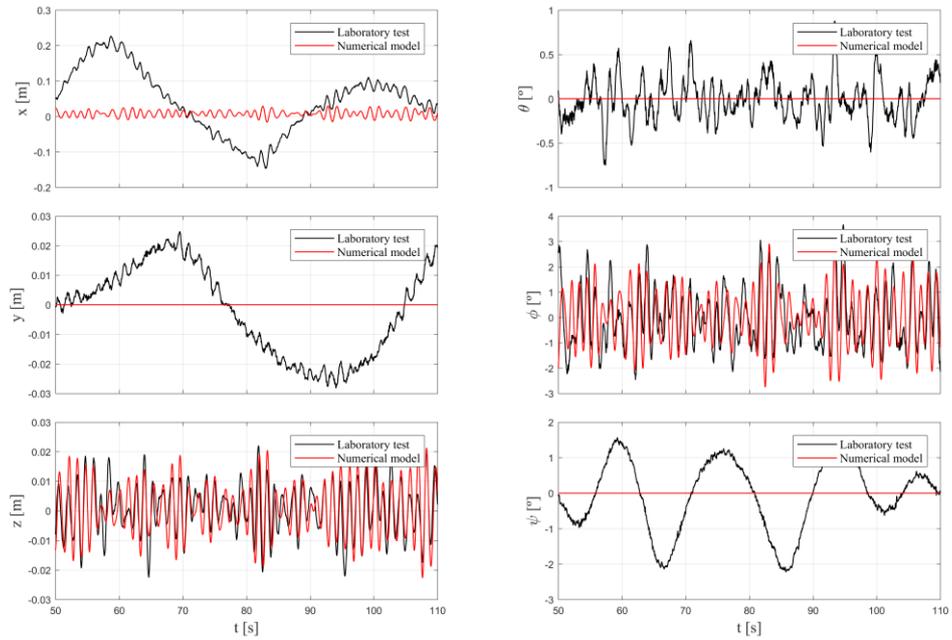
C04: H = 1p5 T = 6p5



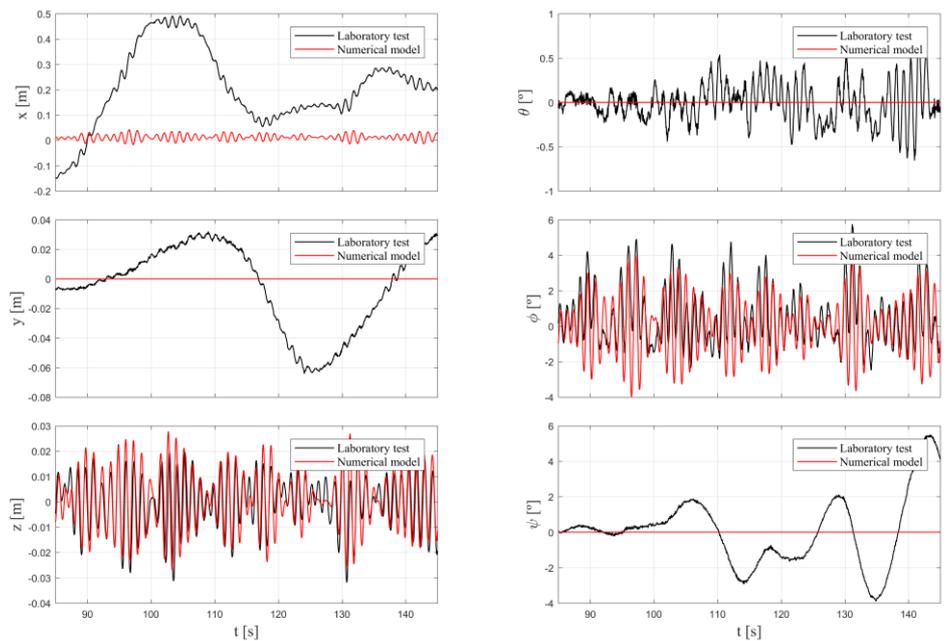
C04: H = 2p5 T = 6p0



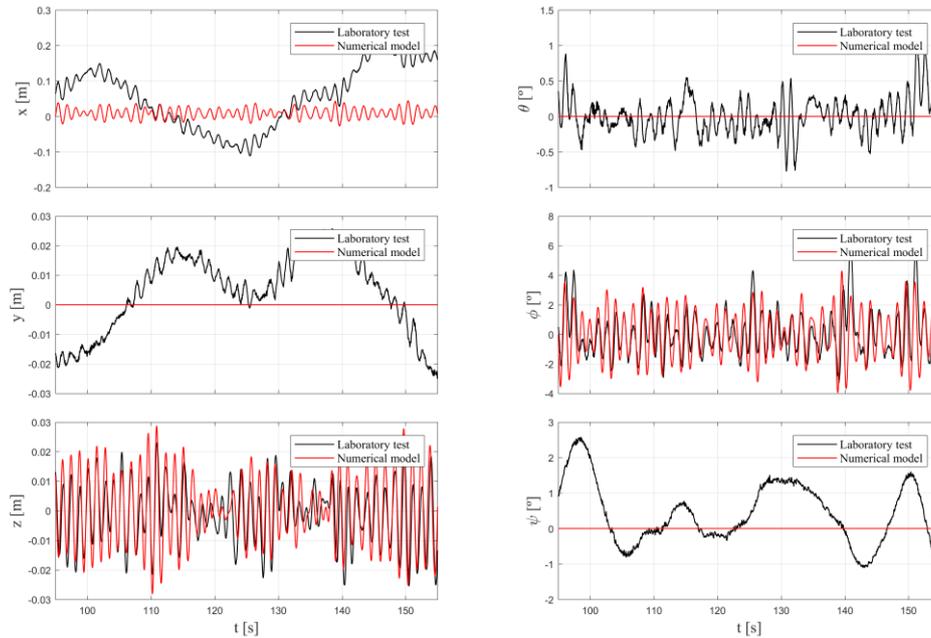
C04: H = 2p5 T = 8p0



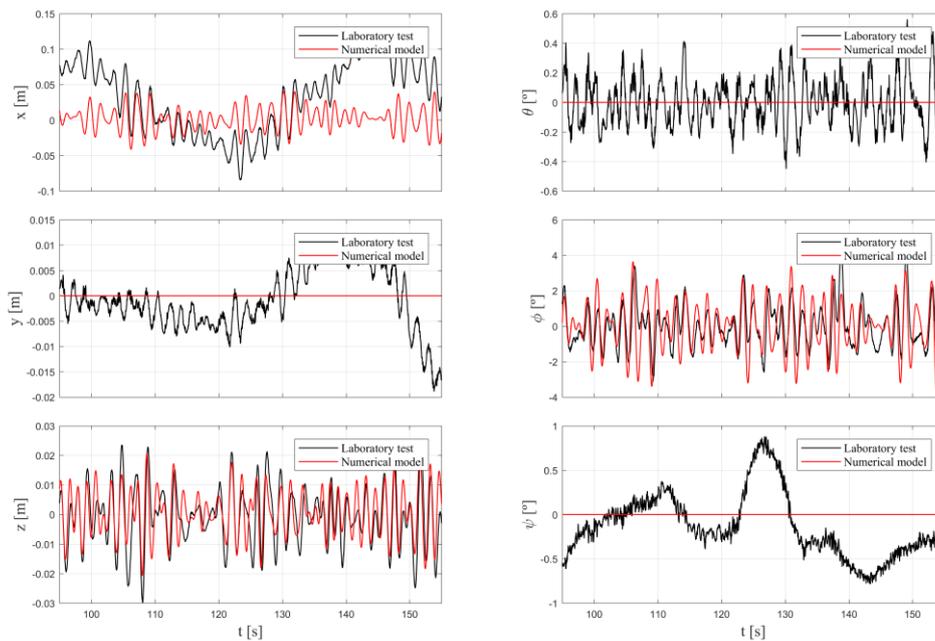
C04: H = 3p0 T = 6p5



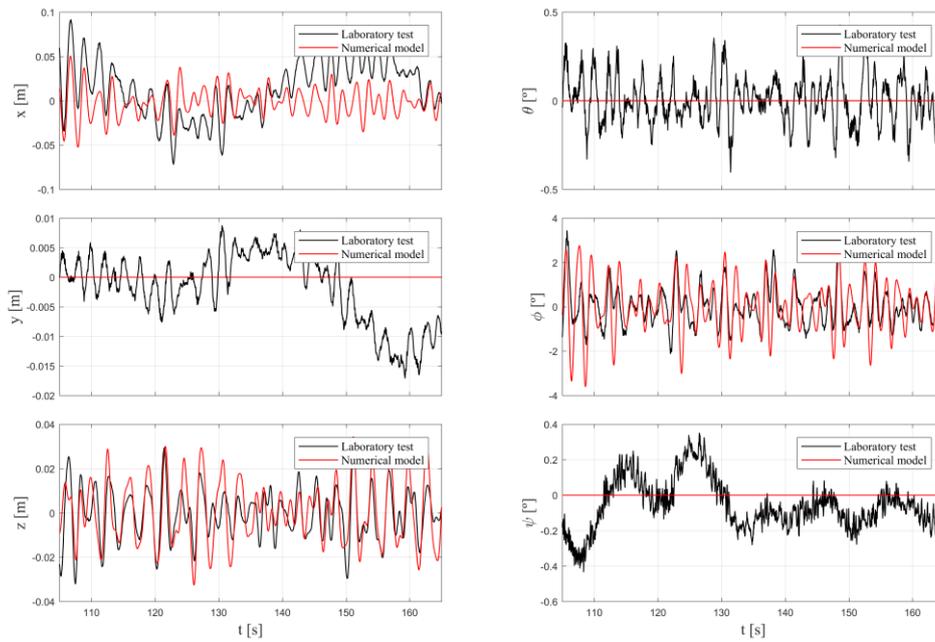
C04: $H = 3p_0$ $T = 8p_0$



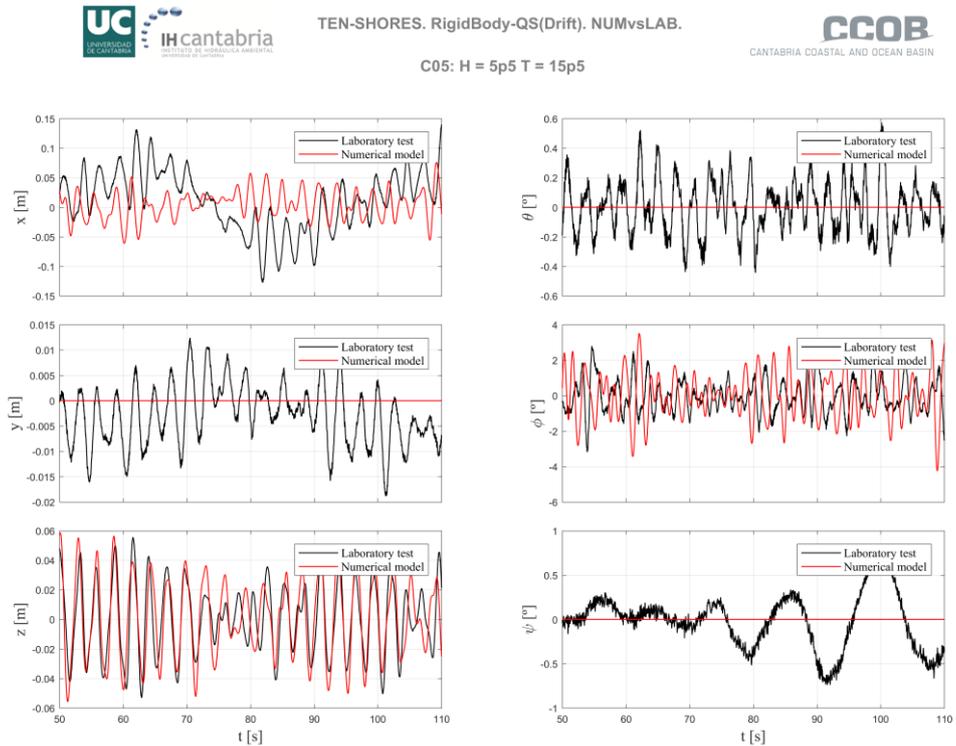
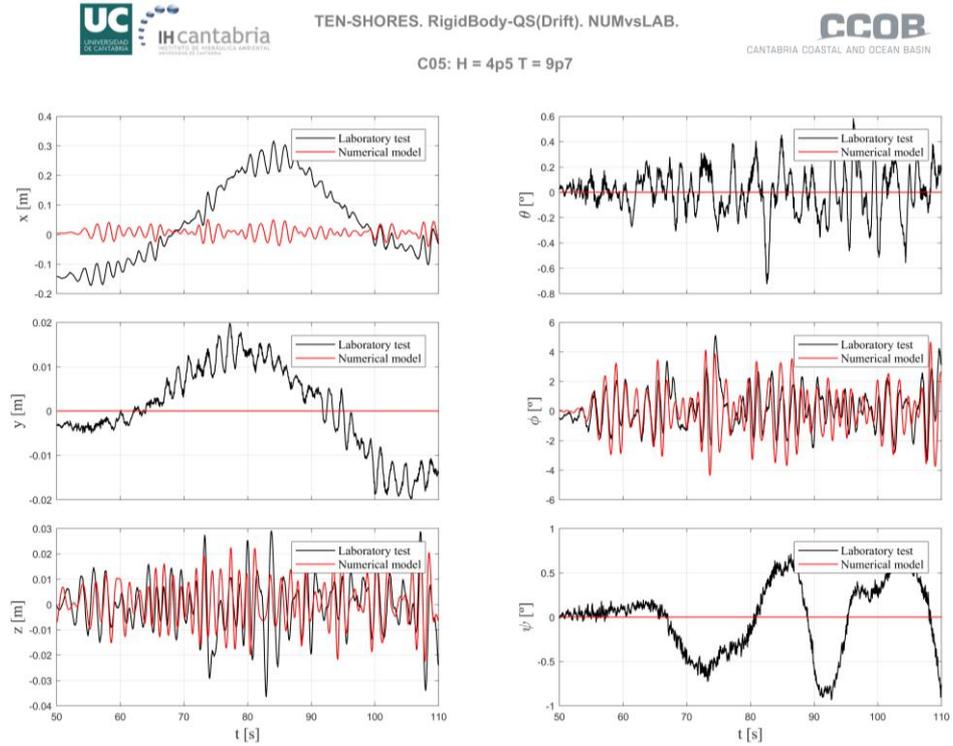
C04: $H = 3p_0$ $T = 10p_0$



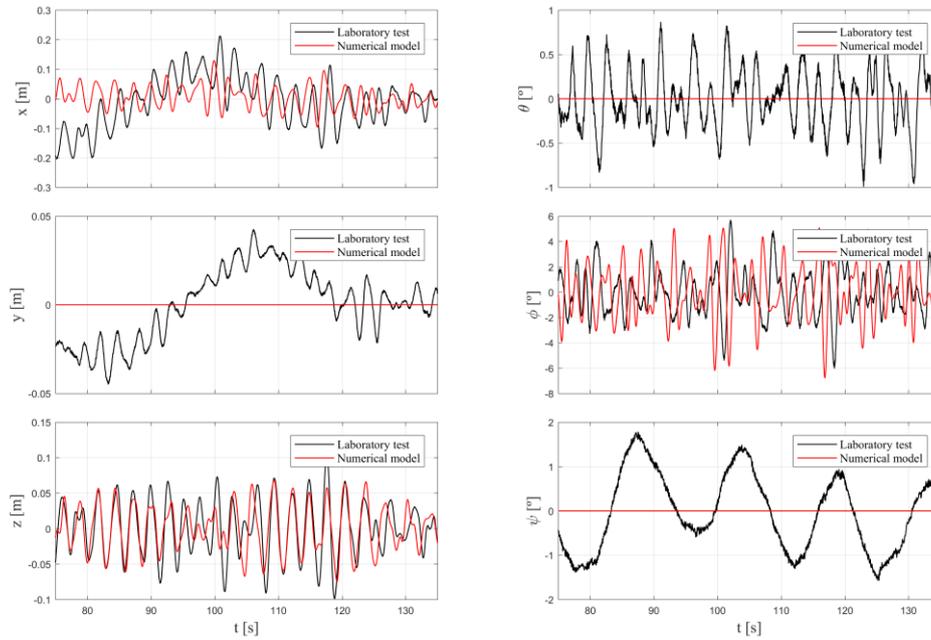
C04: H = 3p0 T = 13p0



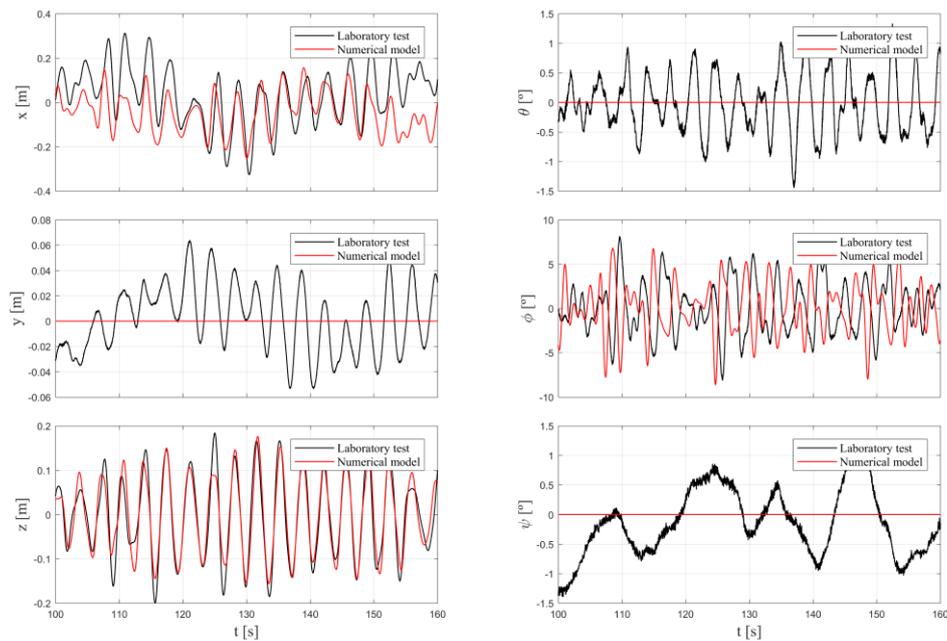
4.1.1.2. Configuración C05



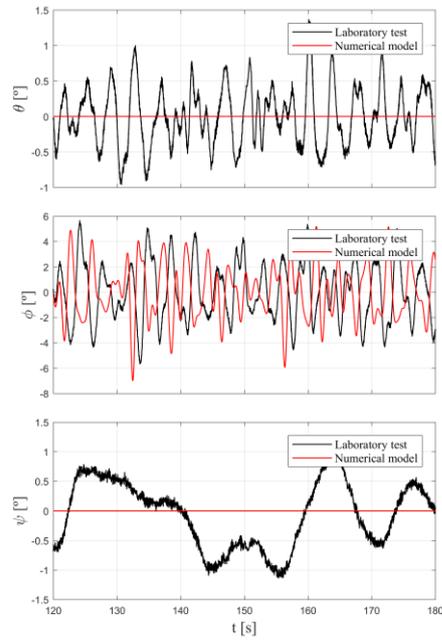
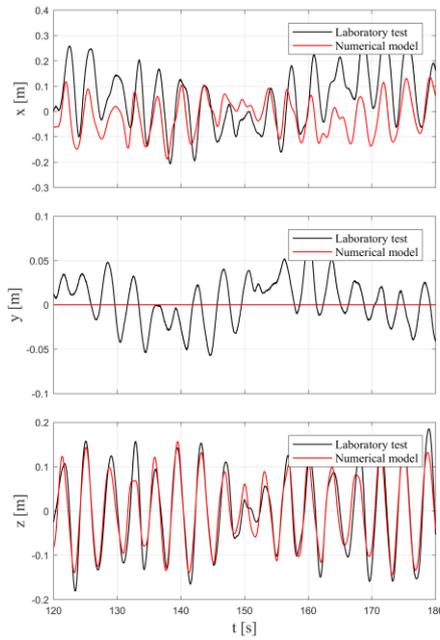
C05: H = 8p5 T = 15p0



C05: H = 13p4 T = 19p0

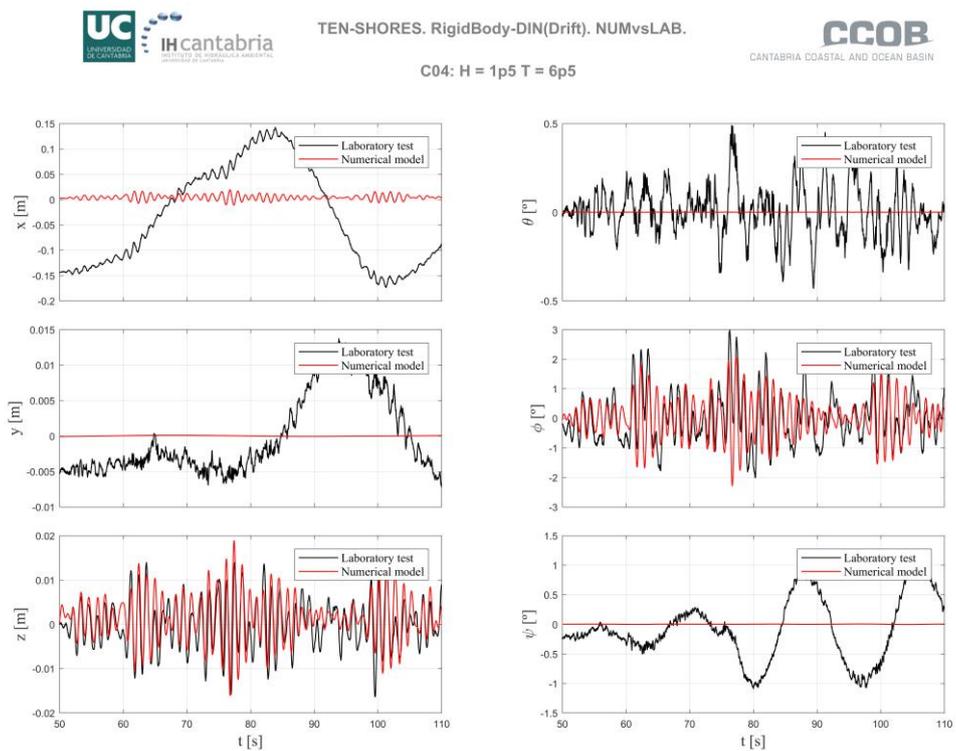
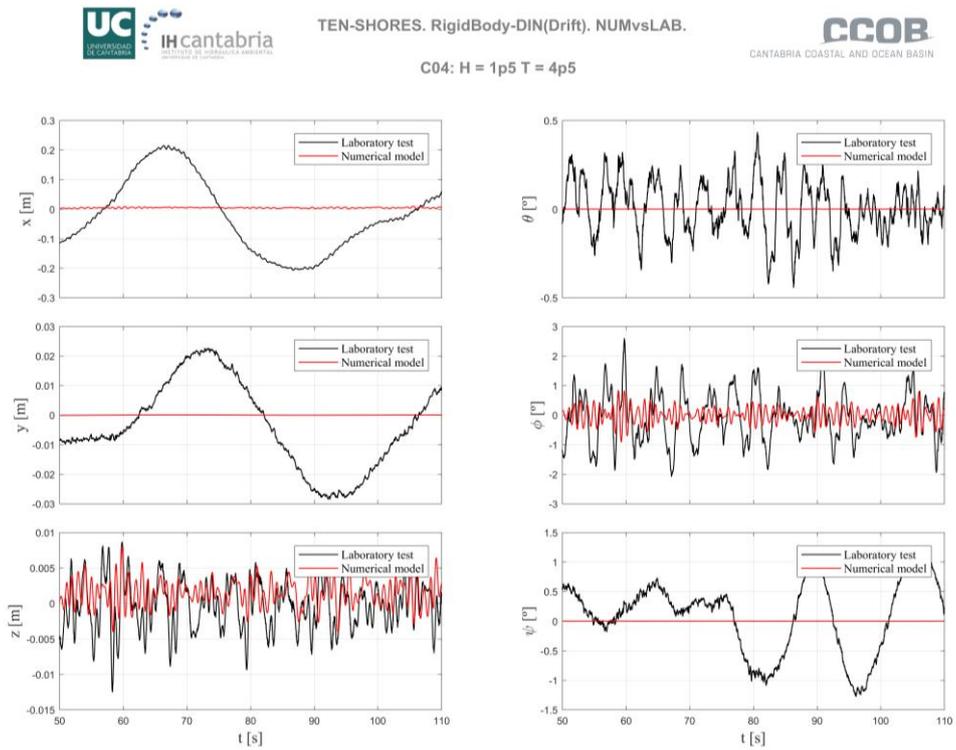


C05: $H = 13p4$ $T = 21p0$

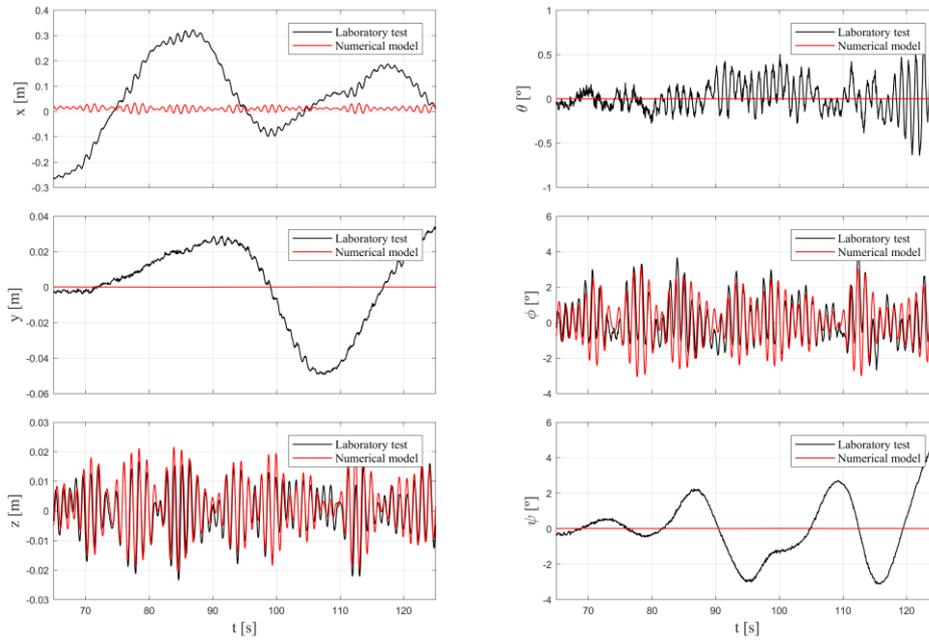


4.1.2. Sólido rígido Dinámico

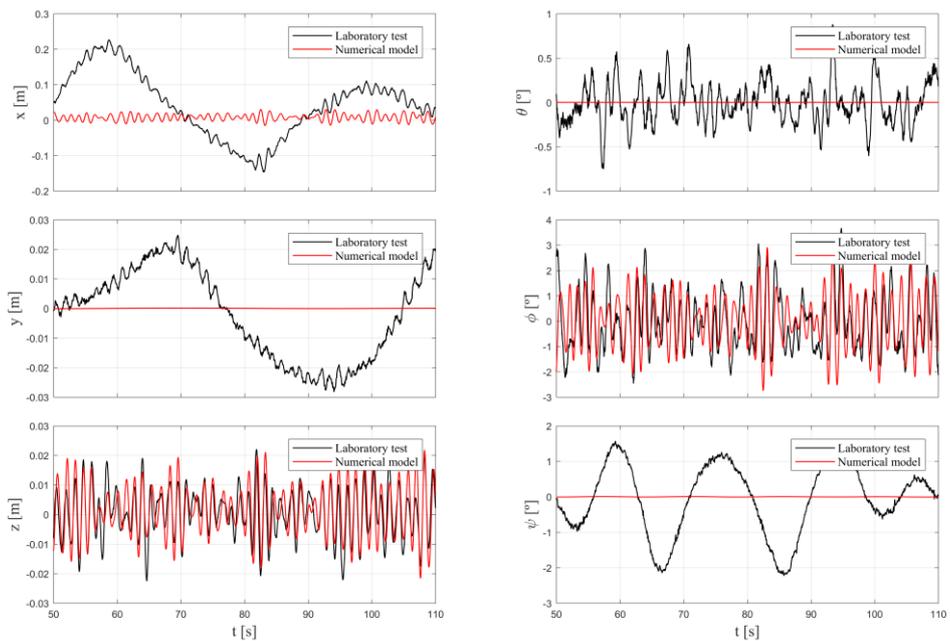
4.1.2.1. Configuración C04



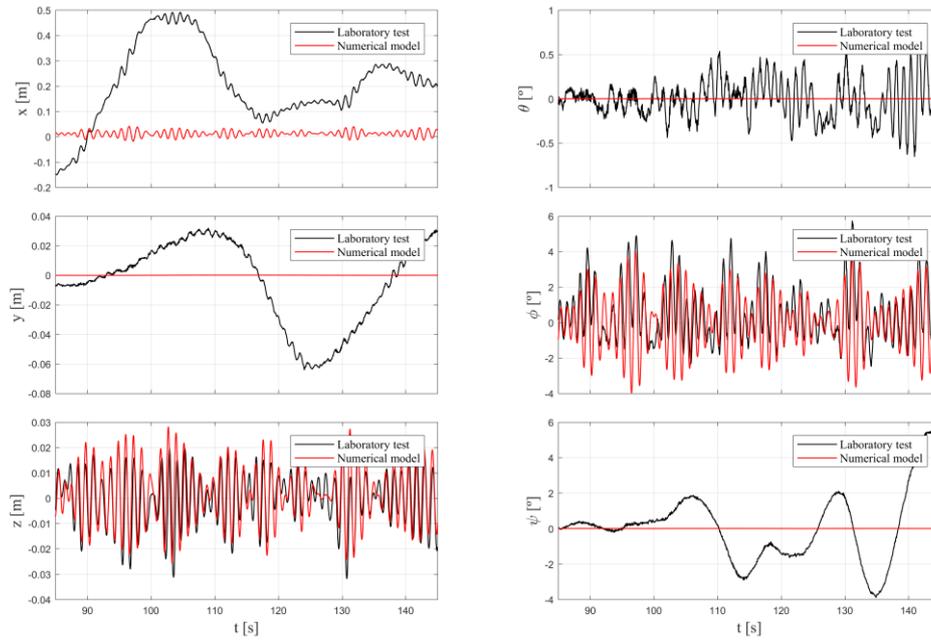
C04: $H = 2p5$ $T = 6p0$



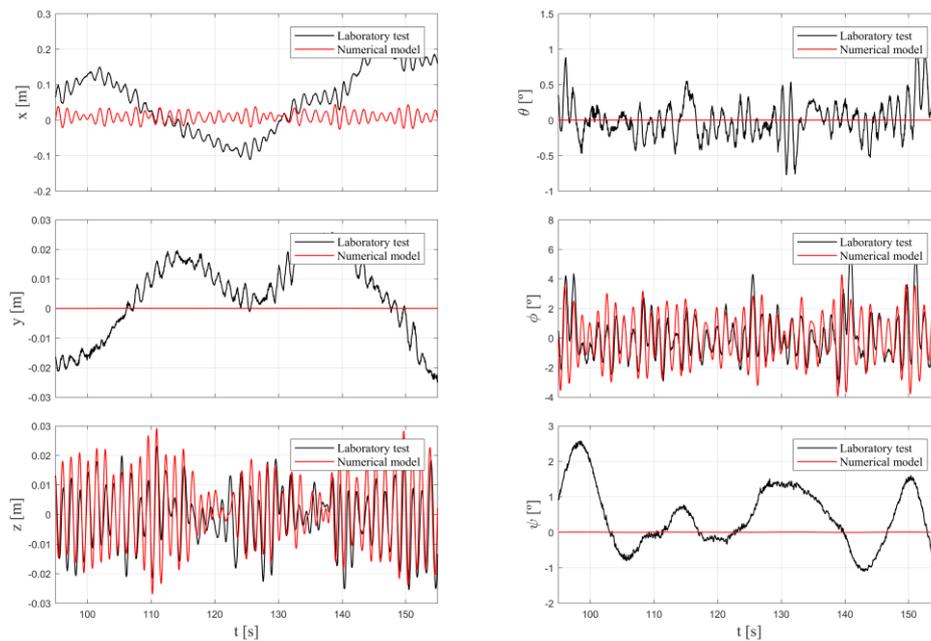
C04: $H = 2p5$ $T = 8p0$



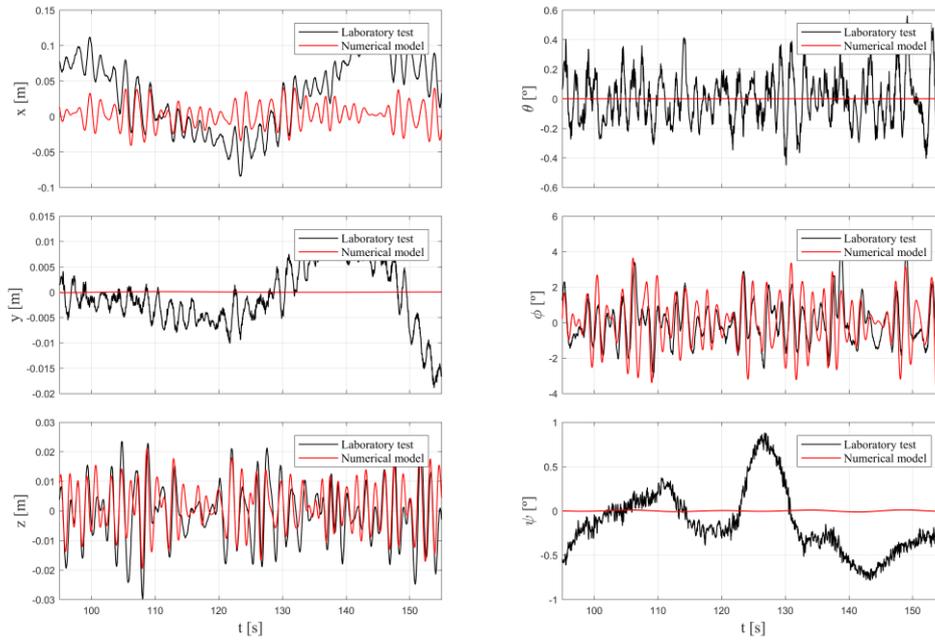
C04: H = 3p0 T = 6p5



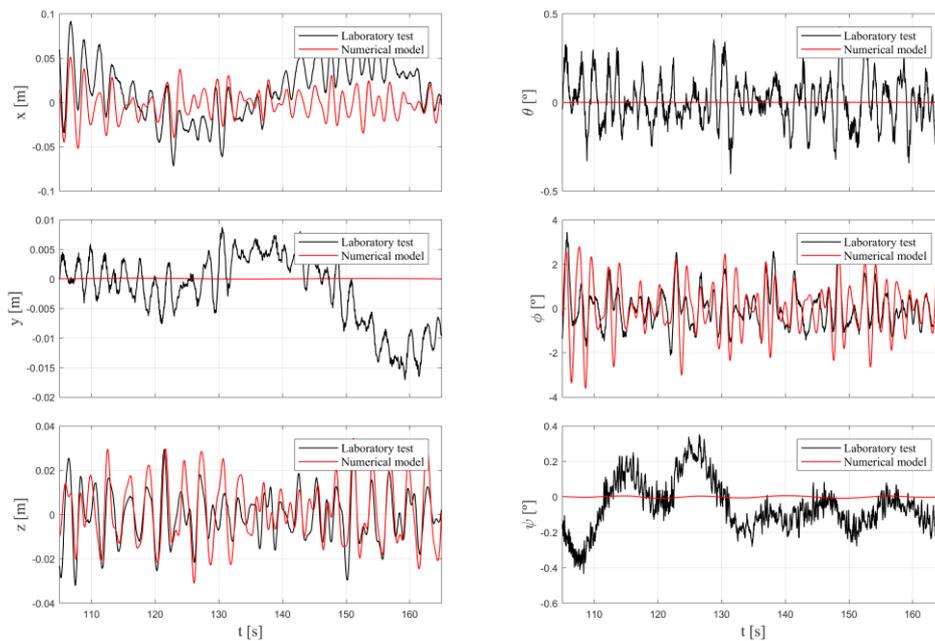
C04: H = 3p0 T = 8p0



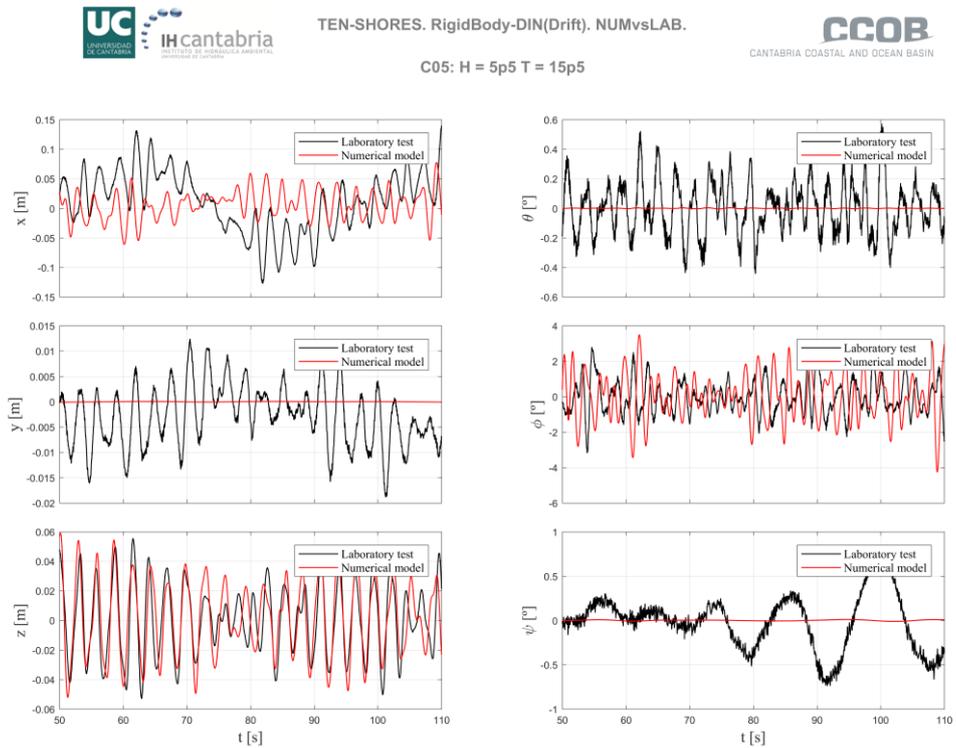
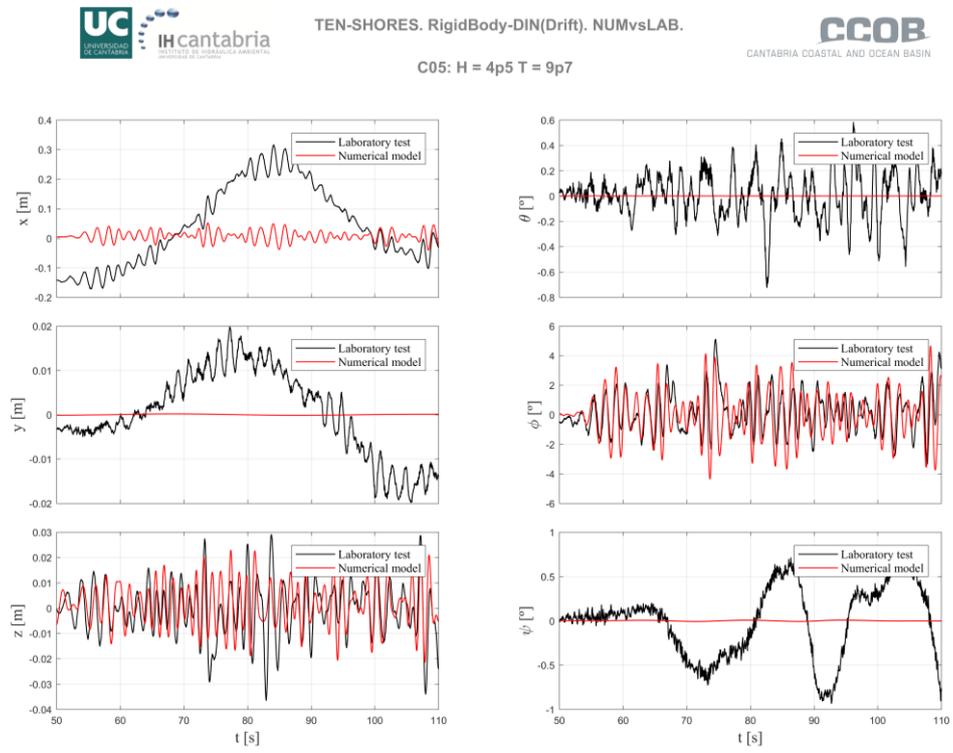
C04: $H = 3p_0$ $T = 10p_0$



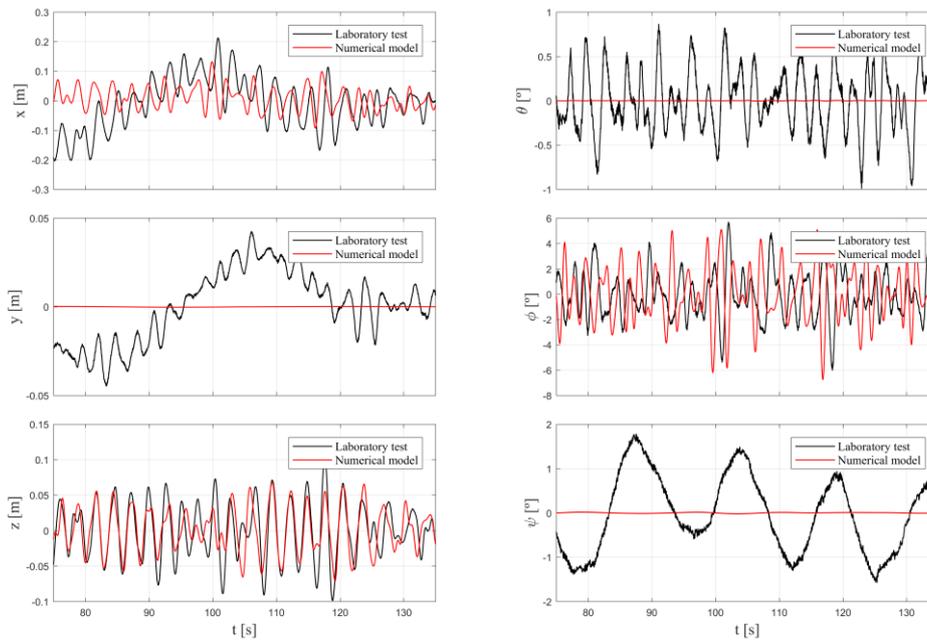
C04: $H = 3p_0$ $T = 13p_0$



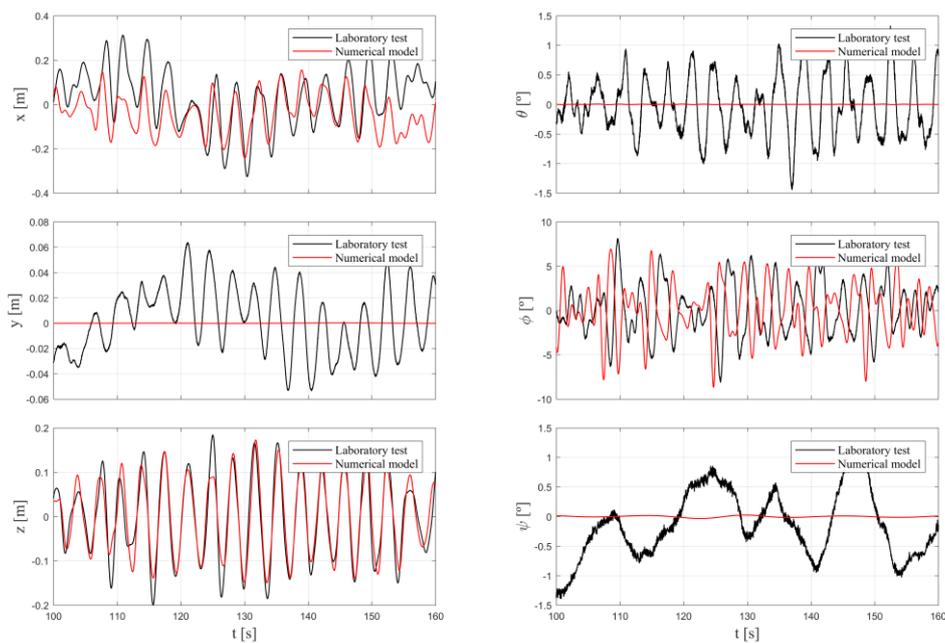
4.1.2.2. Configuración C05



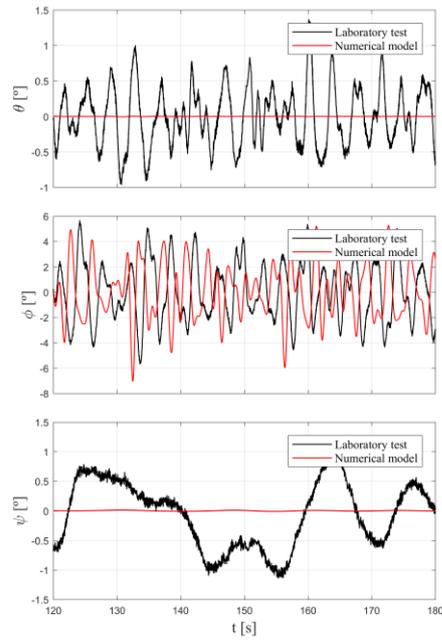
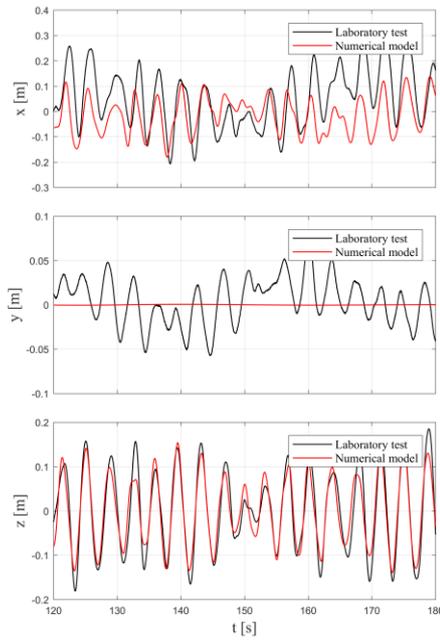
C05: H = 8p5 T = 15p0



C05: H = 13p4 T = 19p0

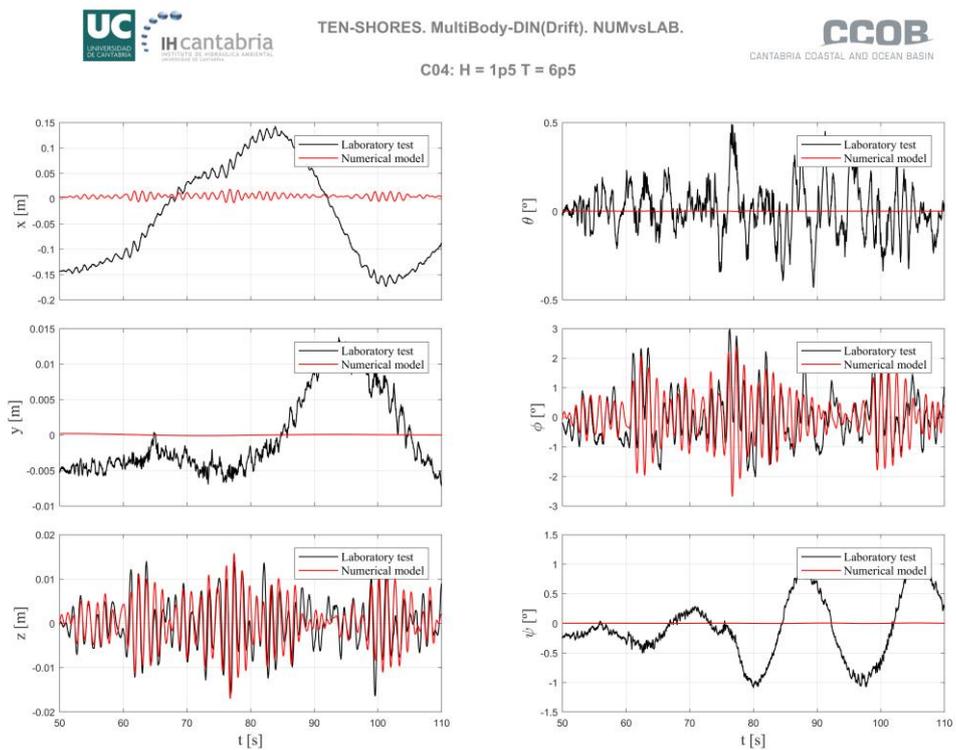
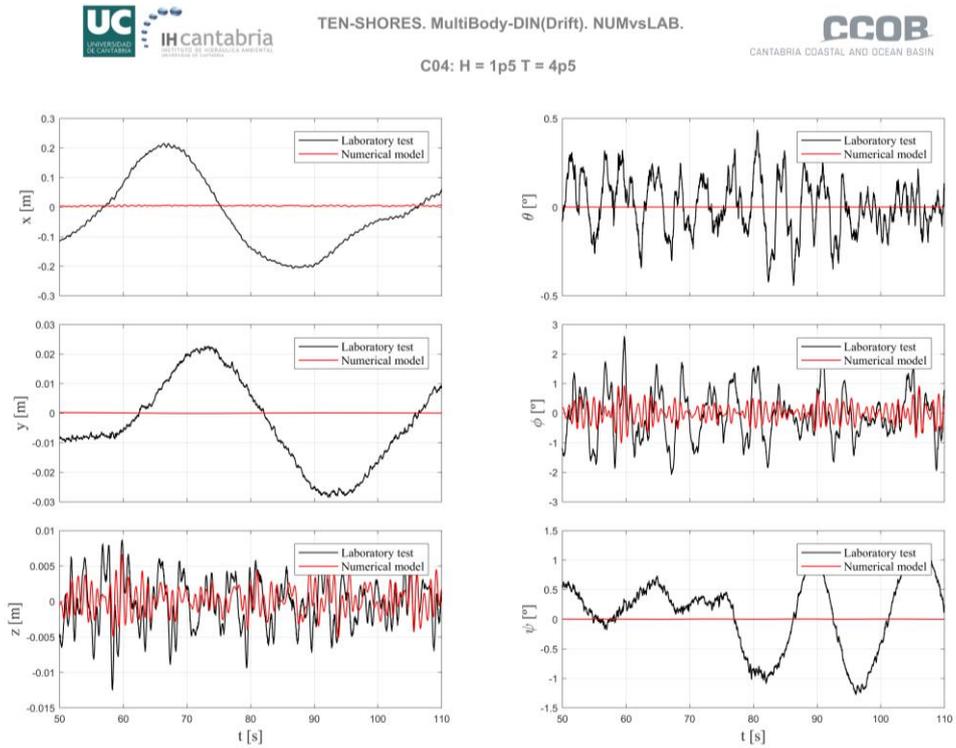


C05: H = 13p4 T = 21p0

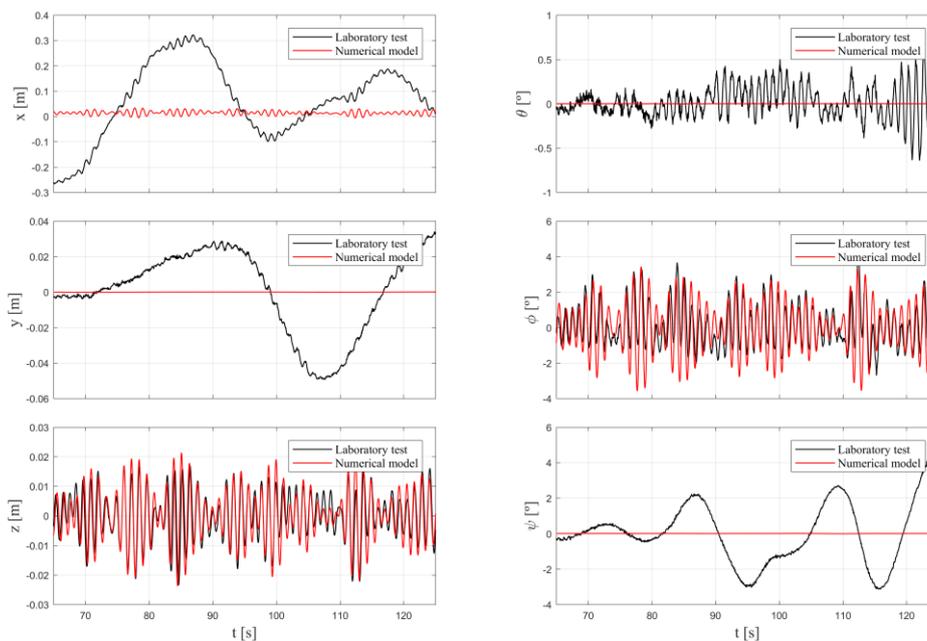


4.1.3. Multicuerpo Dinámico

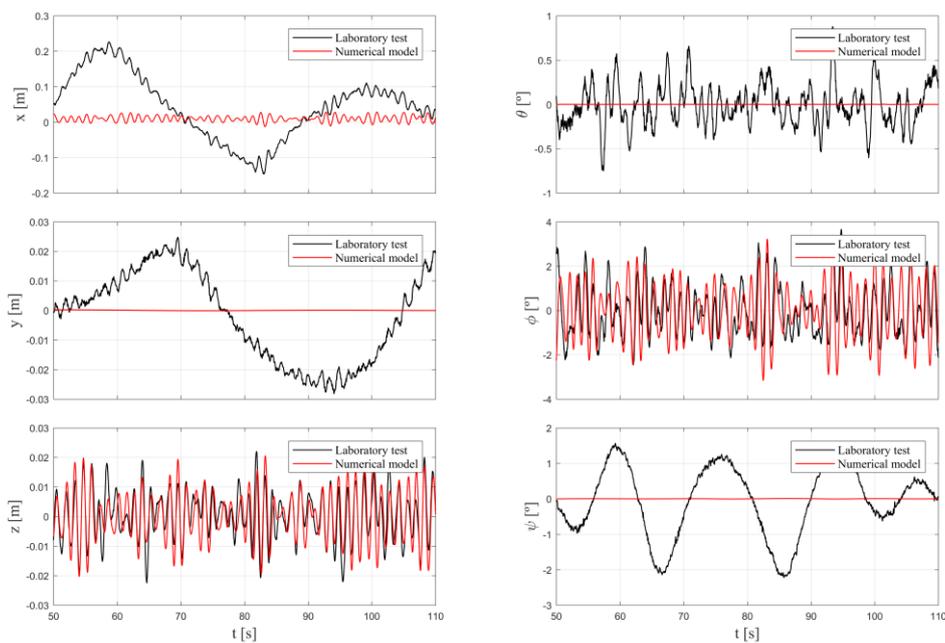
4.1.3.1. Configuración C04



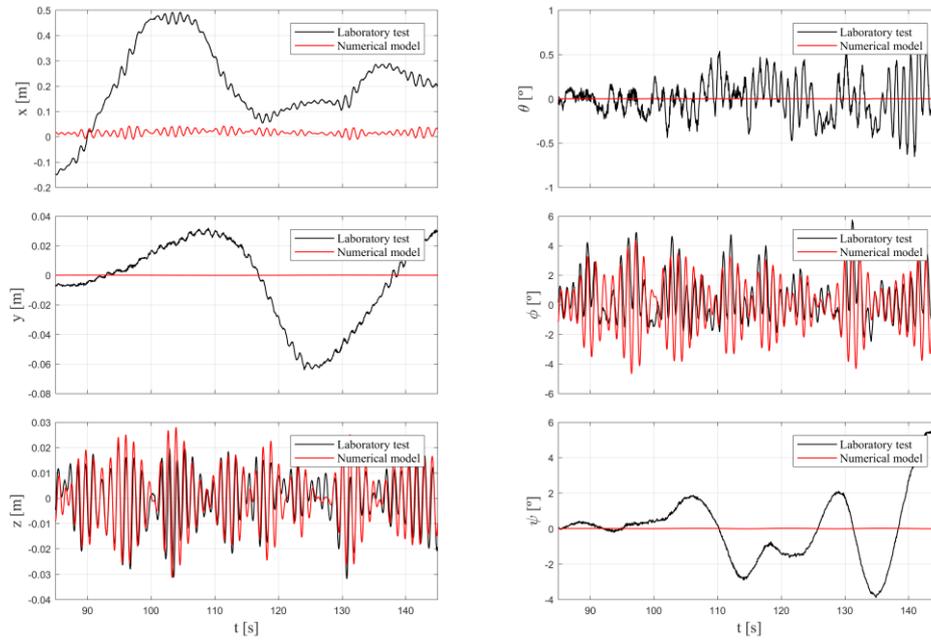
C04: $H = 2p5$ $T = 6p0$



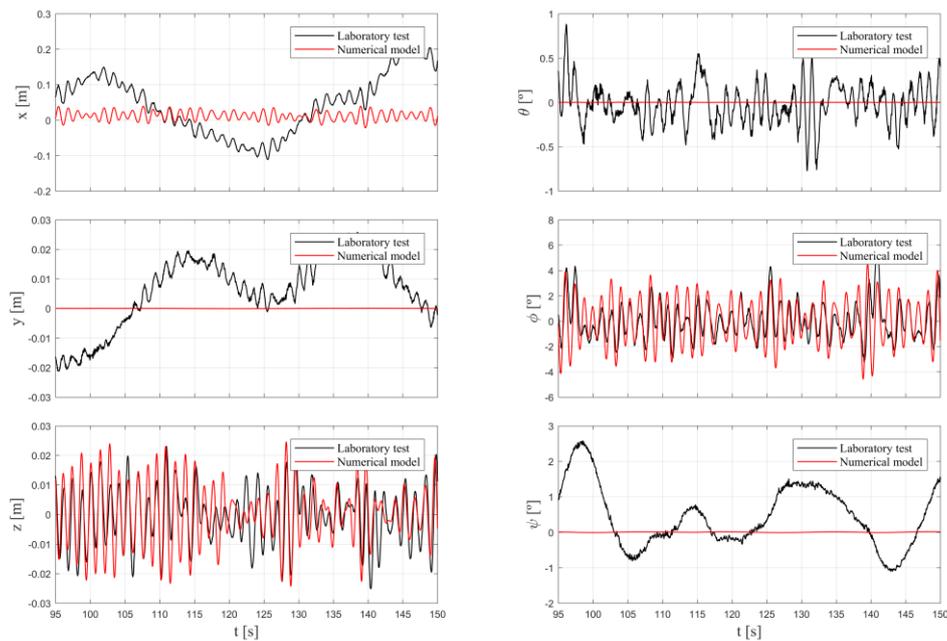
C04: $H = 2p5$ $T = 8p0$



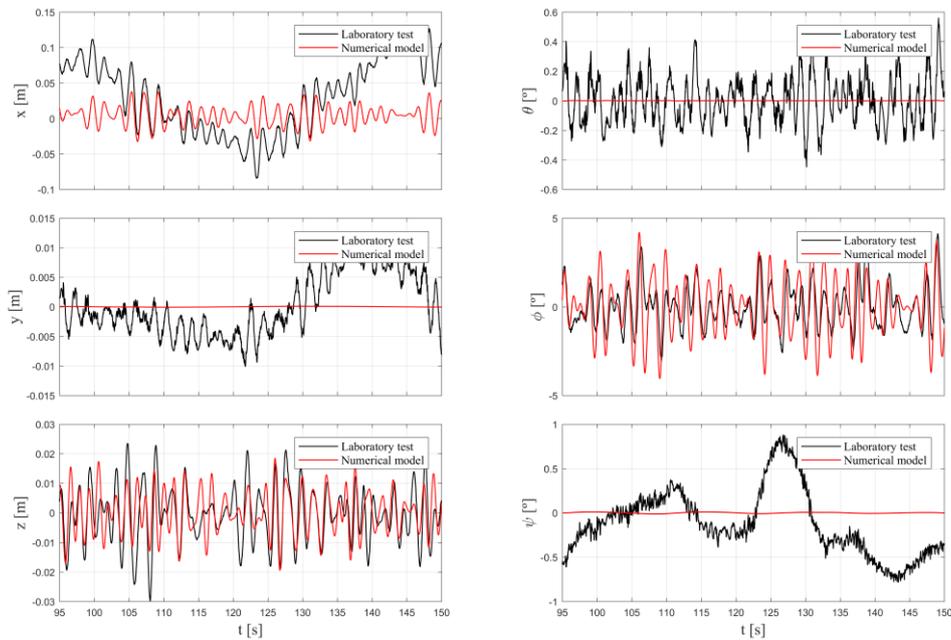
C04: H = 3p0 T = 6p5



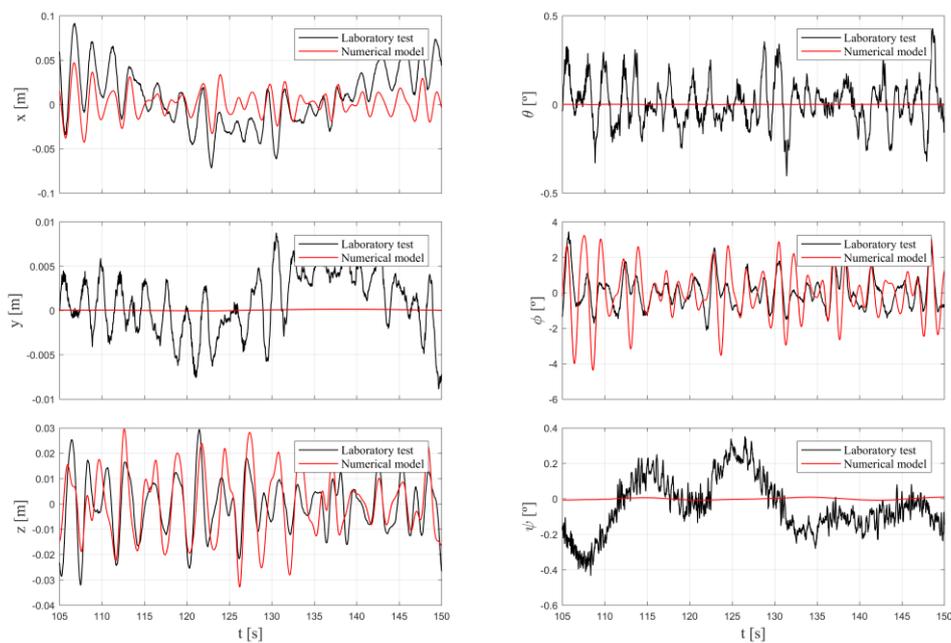
C04: H = 3p0 T = 8p0



C04: H = 3p0 T = 10p0

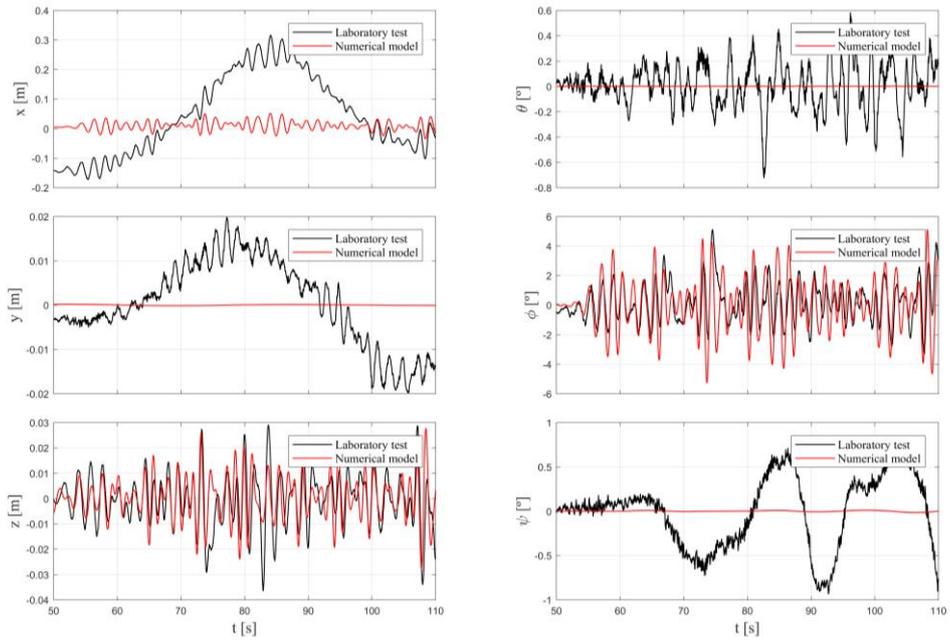


C04: H = 3p0 T = 13p0

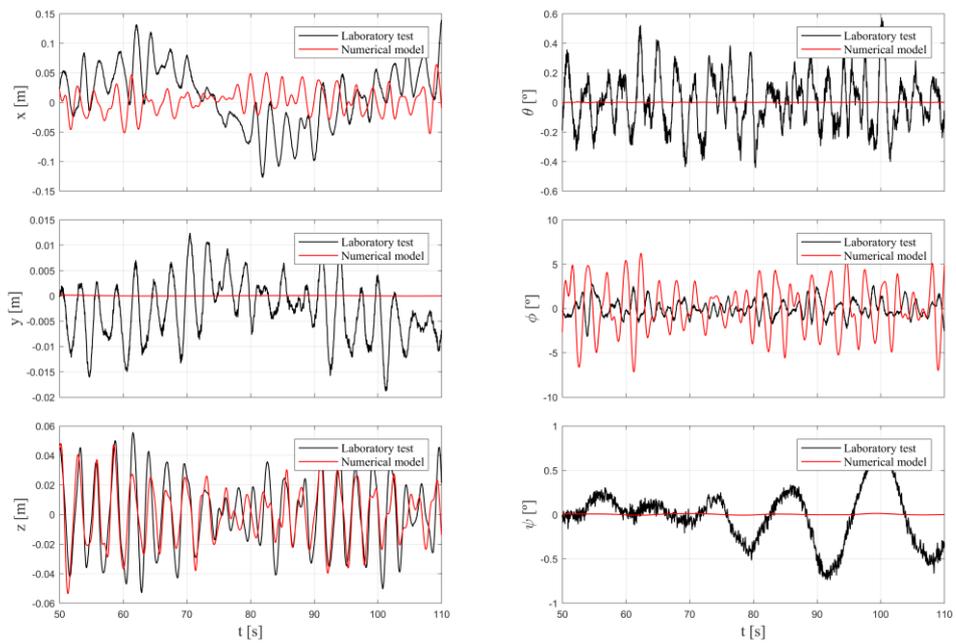


4.1.3.2. Configuración C05

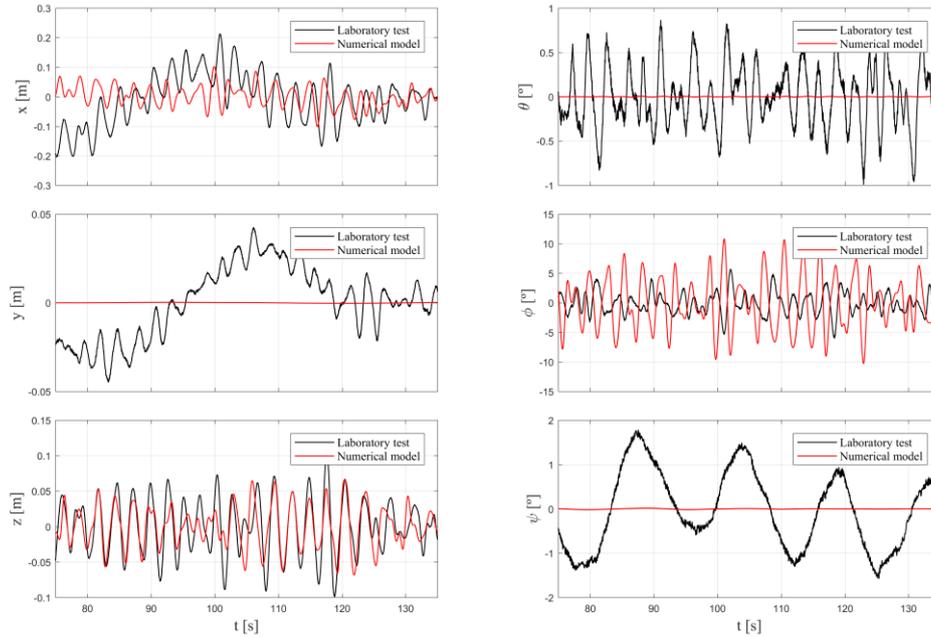
C05: H = 4p5 T = 9p7



C05: H = 5p5 T = 15p5



C05: H = 8p5 T = 15p0



C05: H = 13p4 T = 19p0

