

**TÍTULO:** ESTUDIO NUMÉRICO DE UN DIQUE DE LÁMINAS PENDULARES PARA AMORTIGUACIÓN DEL OLEAJE Y EXTRACCIÓN DE ENERGÍA.

**AUTOR:** FERRAN ARRUFAT GARCIA

**TUTORES:** J.M. CANET, M.A. CELIGUETA

## RESUMEN

El estudio de los efectos que el oleaje produce al incidir en una estructura costera ha sido desde siempre un proceso costoso dada la necesidad de realizar los experimentos en canales adaptados para cada caso particular. El uso de una herramienta numérica basada en resultados experimentales previos, permite realizar esos ensayos con un ahorro de tiempo considerable y sin necesidad de usar las instalaciones y equipos experimentales habituales.

El objetivo de esta tesina es analizar el comportamiento de un dique vertical de cajones con láminas pendulares como sistema de amortiguación del oleaje incidente de manera que se cree un movimiento oscilante del agua en la piscina interior de forma controlada y continua reduciendo las mayores sollicitaciones y, al mismo tiempo, disminuyendo los volúmenes de material necesario, su coste y el impacto ambiental. Por otra parte, se estudiará la posibilidad de generar energía eléctrica en episodios de oleaje para lo cual se dispondrá de una serie de turbinas de fondo que aprovecharían las corrientes inducidas o un sistema de pistones dependiendo de la geometría escogida finalmente.

El método de elementos para partículas (PFEM) desarrollado en el CIMNE permite realizar este tipo de simulaciones aportando, en este caso, información tanto de la evolución de la superficie libre del agua en el trasdós del dique como de la erosión o desgaste que podría llegar a producirse en el entorno del mismo. Modificando las características geométricas del dique en cada ensayo numérico y adoptando las variables externas del oleaje teniendo en cuenta su ubicación geográfica, es posible decidir la viabilidad de dicho proyecto de una forma relativamente objetiva.

La metodología seguida se ha basado principalmente en las continuas modificaciones de la propuesta inicial y la formulación de alternativas con el objetivo de ir mejorando el modelo evolutivamente obteniendo, en cada nuevo ensayo, resultados más ajustados a lo que podría considerarse el modelo físico real.

Dado el contexto en el que se desarrolla esta tesina, se debe tener en cuenta el considerable esfuerzo de coordinación que ha supuesto para los diferentes departamentos e instituciones que forman parte de este proyecto, principalmente en lo referente a los cambios que se han ido realizando en el transcurso de este estudio y que se han aplicado bajo consenso.

Finalmente, y tal como se expone en las conclusiones de esta tesina, se mostrarán cuales han sido los casos de ensayo en los que se ha obtenido los mejores resultados y se propondrán las diferentes líneas de investigación a seguir de cara a continuar con el presente estudio.

*TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.*

**TITLE:** NUMERICAL STUDY OF PENDULUM LIKE MOTION LAMINAR DIKE FOR SWELL ABSORPTION AND ENERGY EXTRACTION

**AUTHOR:** FERRAN ARRUFAT GARCIA

**TUTOR:** J.M. CANET, M.A. CELIGUETA

## ABSTRACT

The study of the effects that sea swell produce when hitting on a coastal structure has usually been a difficult process given the need of performing all the experiments in experimental channels for each study case. The use of a numerical tool based on the previous experimental results, makes it possible to perform these tests saving a considerable amount of time without the need of the usual installations and experimental equipment.

The objective of this dissertation is to analyze the performance of a vertical breakwater consisting in concrete box with oscillating sheets as a system for sea waves energy absorption in a way that it creates an oscillation of the free water surface inside the inner pool of the dike in a controlled way, reducing the greater efforts, the volume of material needed, its costs and the environmental impact.

On the other hand, the potential of electrical energy generation in sea swell episodes will be studied. For this, a group of turbines will be arranged in order to use the induced water flow or a piston system depending of the taken geometry.

The particle finite element method developed by CIMNE makes it possible to perform this kind of simulations contributing with information about the water surface evolution behind the dike and giving information about the erosive effects that could appear in the bottom ground around the structure. Modifying the geometrical characteristics of the breakwater in each model test and with the proper external variables of the sea swell given its geographical location, it is possible to objectively decide the viability of the project.

The used methodology is based on constant changes in the initially given geometry and the suggestion of alternatives with the purpose of improving the model in order to obtain more adjusted results in each new model test

Given the context in which this study is developed, the important coordination efforts between the different departments that works in it must be taken into account. Specially since all the changes applied are given by general consent.

Finally, the conclusions chapter of this dissertation will present the model tests which have given the better results and future study lines will be suggested

**KEYWORDS:** NUMERICAL MODEL TEST - SWELL - SEA BUILDING WORK - PFEM - ENERGY

*TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.*

## Indice

---

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
Indice.....	5
Capítulo 1.....	9
Introducción .....	9
<b>1.1.- Motivación del problema</b> .....	9
<b>1.2.- Antecedentes</b> .....	9
<b>1.3.- Consideraciones técnicas, ambientales y económicas</b> .....	10
<b>1.4.- Estado del arte</b> .....	11
1.4.1.- <i>Estado del arte sobre modelos numéricos</i> .....	11
1.4.2.- <i>Estado del arte en los cajones de hormigón</i> .....	12
<b>1.5.- Objetivos de la tesina</b> .....	17
<b>1.6.- Contexto</b> .....	18
Capítulo 2.....	19
Bases del método de elementos finitos para partículas .....	19
<b>2.1.- Introducción al método de los elementos finitos para partículas (PFEM)</b> .19	
<b>2.2 .- Algoritmo básico del PFEM</b> .....	20
<b>2.3.- Descripción del algoritmo de interacción acoplada fluido-estructura (FSI)</b> .....	21
<b>2.4.- Formulación FIC/FEM para un fluido incompresible</b> .....	23
2.4.1.- <i>Transformación de la ecuación de balance de masa</i> .....	24
2.4.2.- <i>Discretización en elementos finitos</i> .....	26
2.4.3.- <i>Algoritmo del paso fraccionado para las variables de fluido</i> .....	27
<b>2.5.- Esquema escalonado para el problema FSI</b> .....	30
<b>2.6.- Tratamiento del contacto entre fluido y sólido</b> .....	30
<b>2.7.- Generación de una nueva malla</b> .....	32
<b>2.8.- Identificación de las superficies de contorno</b> .....	32
2.8.1.- <i>Contacto entre interfaces sólido-sólido</i> .....	33
Capítulo 3.....	35
Modelado del sistema.....	35
<b>3.1.- Estudios Propuestos</b> .....	35

<b>3.2.- Ajustes realizados sobre geometría y condiciones de contorno</b> .....	37
<b>3.3.- Parámetros de referencia.</b> .....	38
<b>3.4.- Modificaciones de los estudios propuestos inicialmente.</b> .....	41
3.4.1.- Modelos con Fuerza Puntual Aplicada .....	41
3.4.2.- Modelos con Disipación de Energía.....	43
3.4.3.- Modelo con Péndulo Inmóvil.....	44
3.4.4.- Modelo con Péndulo Invertido.....	44
<b>Capítulo 4.</b> .....	<b>47</b>
<b>Simulación numérica y discusión de resultados</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1.- Ajustes realizados sobre mallado, geometría y condiciones de contorno.</b> .....	47
4.1.1.- Mallado.....	47
4.1.2.- Geometría y condiciones de contorno del módulo de cálculo .....	48
<b>4.2.- Resultados referentes a los sensores de superficie</b> .....	48
4.2.1.- Ensayos propuestos inicialmente .....	48
4.2.2.- Ensayos con longitud de piscina modificada.....	53
4.2.3.- Comparación de registros en el punto A con y sin dique.....	59
4.2.4.- Comparación de registros en el punto A y C en el caso de fuerza aplicada .....	61
4.2.5.- Comparación de registros en el punto A y C en el caso de existir una zona disipativa. ....	63
4.2.6.- Comparación de registros en el punto A en el caso del dique pendular inverso.....	64
<b>4.3.- Resultados referentes a los esfuerzos y oscilaciones del CG del péndulo</b> .....	66
4.3.1.- Ensayos con longitud de piscina inicial .....	66
4.3.2.- Ensayos con longitud de piscina modificada.....	68
<b>4.4.- Resultados referentes al campo de velocidades y presiones en el entorno del dique de láminas</b> .....	72
4.4.1.- Ensayos con longitud de piscina inicial .....	72
4.4.2.- Ensayos con longitud de piscina modificada.....	79
4.4.3.- Ensayos con fuerza puntual aplicada. ....	85
4.4.4.- Ensayos con zona disipativa. ....	88
4.4.5.- Ensayos con dique inverso.....	91

Capítulo 5.....	95
Conclusiones y estudios futuros .....	95
Capítulo 6.....	97
Referencias.....	97
Capítulo 7.....	99
Agradecimientos.....	99
Capítulo 8.....	101
Anejos.....	101
ANEJO 1. PRODUCCIÓN DE OLAS ARTIFICIALES.....	101
ANEJO 2 - A TIME DOMAIN METHOD FOR SEPARATING INCIDENT AND REFLECTED IRREGULAR WAVES .....	103
ANEJO 3 - WAVEMAKER THEORY .....	107
ANEJO 4 - LABORATORY WAVE GENERATION .....	107

*TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.*

# Capítulo 1.

## Introducción

---

### 1.1.- Motivación del problema

La actual dificultad para obtener materiales de cantera y las limitaciones medioambientales que afectan a las actuaciones del hombre en el medio marino provocan que los usuales diseños y tecnologías de este tipo de obras deban ser revisadas en base a la experiencia acumulada a lo largo de las últimas décadas.

Por otra parte la actual crisis energética y el efecto del cambio climático está causando un mayor interés y empeño por aprovechar al máximo las energías renovables.

La sociedad es consciente de la enorme cantidad de energía que se encuentra en los mares, simplemente ver el oleaje en un día en que este tenga fuerza da idea de su potencial. En la actualidad existen diferentes iniciativas para el aprovechamiento de la energía del oleaje; en Portugal, por ejemplo, se ha estado trabajando durante varios años en una instalación OWC en la isla de Pico en las Azores. España, con sus más de 3.900 Kilómetros de longitud de costa, es uno de los países más interesados en este tipo de tecnología.

La idea en este caso, es optimizar el diseño de las estructuras que facilitan abrigo a los puertos (diques) y aprovechar al máximo posible toda la energía del mar, cuando éste choca contra un dique marítimo. Hasta la fecha, los diques son “masas” inmóviles cuya única finalidad es frenar esa fuerza del mar.

Con este estudio se pretende no sólo reducir el coste constructivo de dicho dique, sino convertir la energía del oleaje incidente en energía eléctrica utilizable.

Los diques construidos mediante cajones de hormigón, ofrecen unas posibilidades enormes en este sentido al ser un elemento que, pese a algunas limitaciones estructurales, ofrece muchísimas posibilidades dada la facilidad con la que se puede variar su diseño con diversos objetivos.

### 1.2.- Antecedentes

El uso extensivo de cajones verticales se generalizó en los últimos años del siglo XX, en principio forzado por la conciencia ecológica y, más tarde, por las mejoras de plazos y costes.

Sin embargo, la utilización de cajones celulares tal como son concebidos actualmente para la construcción de diques rompeolas no es adecuada o, sencillamente, es aún inviable en algunas situaciones. Fundamentalmente los motivos que lo invalidan son estéticos, constructivos (al requerir instalaciones especiales debidas a su gran tamaño), ambientales (necesidad de reducir volumen de materiales en la estructura del rompeolas) y geotécnicos (el terreno debe tener una capacidad portante adecuada y hay que esperar para su asentamiento o consolidación, requiriendo enormes dragados y sustituciones por otros materiales).

En este estudio se pretende dar una solución eficiente (siempre que se den circunstancias de terrenos favorables) que suponga un progreso importante en la reducción de volúmenes de materiales en la estructura del rompeolas para determinados niveles de abrigo requeridos, siendo una solución a determinados problemas estéticos al reducir la cota de coronación.

En los últimos años se han desarrollado diseños innovadores que buscan que las cargas provocadas por el oleaje sean, a su vez, minoradas por una disipación escalonada, en etapas.

Por otra parte, el creciente interés por la utilización de las energías renovables es un hecho incuestionable que ha llevado a los gobiernos y a las empresas de los países más avanzados a establecer políticas de investigación y desarrollo en este campo con el objetivo de mejorar la tecnología y el rendimiento energético de estas nuevas fuentes no contaminantes.

Diversas iniciativas de energía undimotriz de pequeña escala – de 100 kilovatios (kV) a 2 megavatios (MV) – están instalándose actualmente en más de una docena de países. Escocia ha operado una planta OWC experimental de 75 kV en la costa de la isla de Islay durante 11 años, que ahora ha sido reemplazada por un modelo de 500 kV, llamada Limpet, frente a las olas que vienen a romperse en las rocas desde 5.000 kilómetros del Atlántico. El mismo grupo de investigadores está planeando un dispositivo de alta mar de 2 MV llamado Osprey

La costa española, con sus más de 3.900 Km. de longitud, resulta particularmente apropiada para la implementación de este tipo de instalaciones.

España es un referente en la generación de energía hidroeléctrica, y un campo con un enorme interés es el de la extracción de energía del oleaje. Cada vez más empresas de España, apoyadas en los recientes avances tecnológicos, invierten en este tipo de energía, concienciados de que las energías renovables pueden ser de gran ayuda para evitar los problemas de contaminación y escasez de recursos energéticos.

A pesar de ello, este campo se encuentra en estos momentos en una fase incipiente de investigación y desarrollo debido a la mayor dificultad tecnológica y a su hasta ahora limitado rendimiento económico. La razón principal es que la tecnología para hacer eficientes este tipo de sistemas es muy reciente y sólo ha sido posible desarrollarla de forma viable en los últimos años con la ayuda de programas de I+D financiados por países avanzados como Estados Unidos, Reino Unido, Japón, Alemania, etc.

El estudio propuesto elimina estos inconvenientes y permite plantear una alternativa viable a los desarrollos de este tipo de sistemas que hasta la fecha se estaban implantando de forma poco convincente.

### **1.3.- Consideraciones técnicas, ambientales y económicas**

Existen una serie de sinergias y objetivos comunes que se producen entre las obras de abrigo y las obras de aprovechamiento energético que abarcan diversos aspectos de tipo económico, técnico y ambiental:

### *Aspectos económicos*

El nuevo diseño permite obtener determinados niveles de abrigo a unos costes menores. Además, parte del aprovechamiento energético puede financiar las obras de abrigo de un puerto y por tanto puede implicar la viabilidad económica de una instalación portuaria que hasta la fecha no resultase viable.

La ejecución o ampliación de un puerto en base a una obra de abrigo de baja cota de coronación es visualmente más atractivo, por ejemplo de cara al turismo, y puede conllevar la necesidad de desarrollo económico de una zona y por tanto una cantidad de energía mayor para cubrir dicha demanda.

### *Aspectos técnicos*

La estructura de láminas pendulares disminuye las reflexiones de oleaje frente al dique y mejorar así la maniobrabilidad en esa zona a la vez que minimizarlos rebases por encima de la estructura, disminuyendo por tanto su cota de coronación. Así mismo, las láminas también pueden minimizar los esfuerzos sobre las obras de abrigo y por tanto reducir su coste.

El sistema puede impedir la aparición de presiones impulsivas que habitualmente encarecen las obras de tipologías verticales convencionales.

### *Aspectos ambientales*

El desarrollo de nuevas tecnologías de obras de abrigo puede implicar un cambio en los estándares de diseño de este tipo de estructuras fomentando el estudio de nuevas tipologías que puedan aprovechar la energía del oleaje, o bien minimicen el impacto visual de su implantación. La iniciativa privada podría desarrollar nuevas tecnologías de mínimo impacto visual si existe una posibilidad de aprovechamiento energético que justifique estudios de investigación.

La disminución de las reflexiones frente al dique minimiza la cota de coronación de la obra y por tanto su impacto visual.

La fuente de energía, es decir, el oleaje, es un recurso inagotable en el tiempo y de gran extensión espacial lo cual garantiza la sostenibilidad de este medio de extracción.

La interacción entre la Ingeniería Civil y la Ingeniería Industrial en el mar puede favorecer el estado del conocimiento de las obras de abrigo. Este aspecto puede ser beneficioso en el campo de la instrumentación y conservación de este tipo de infraestructuras, aspecto que resultará muy relevante en futuras décadas.

## **1.4.- Estado del arte**

### *1.4.1.- Estado del arte sobre modelos numéricos.*

La realización de estudios sobre proyectos concretos mediante modelización numérica basados en ensayos experimentales es un campo de investigación relativamente nuevo y existen aspectos aun no implementados en la simulación de las interacciones fluido estructura, como por ejemplo los sistemas de absorción de oleaje

reflejado que puede distorsionar los resultados, método ya existente en instalaciones para este tipo de experimentos.

Dada la necesidad intrínseca de simular la generación de olas y el movimiento de las partículas del agua, así como la respuesta del dique pendular ante el oleaje generado, el módulo de cálculo utilizado en este estudio es el método de elementos finitos para partículas o PFEM (Particle Finite Element Method) desarrollado por Oñate *et al* [1], [2], [3] i [4] i Idelhson [5] i [6] que permite valorar de forma precisa la evolución de la altura de la superficie libre del agua en el trasdós del dique y los posibles efectos de desgaste que puedan producirse en el fondo marino debido a las corrientes generadas por oleaje incidente. Dicha metodología se explicará en el capítulo 2 de este documento.

#### *1.4.2.- Estado del arte en los cajones de hormigón*

En un principio, la construcción tradicional de grandes diques rompeolas (tipología de diques en talud) suponía la aportación de enormes cantidades de todo uno o escollera que constituye el núcleo de la sección, recubierto por mantos de protección, bien naturales de escollera, bien artificiales con bloques de hormigón o con ambos en varias capas.

La minoración de los volúmenes de materiales caros (hormigón) propició un proceso continuo de búsqueda en el que se sucedieron las fases de optimización de las formas de los bloques exteriores que permitiesen la colocación en una sola capa.

La alternativa de cajones verticales para los diques rompeolas, si bien es antigua, ha sido profusamente utilizada en la segunda mitad del siglo XX, y a partir de los años 60 comienzan a investigarse soluciones hidrodinámicas ventajosas, sobre todo en Francia y Japón, con agujeros, cámaras, eliminación del chapoteo etc. No obstante, la gran necesidad que en los últimos años ha habido en España de construcción de obras marítimas y la enorme variedad de condicionantes medioambientales y geotécnicos que se presentan en las costas españolas, han provocado la aparición de situaciones problemáticas, con difíciles soluciones conceptuales.

Además, el coste de reparaciones en este tipo de estructuras resulta excesivamente alto y su ejecución, en ocasiones, inviable. Por otra parte, la utilización de cajones celulares prismáticos para la construcción de diques rompeolas no es adecuada o, sencillamente, es aún inviable en algunas situaciones con condicionantes estéticos.

A pesar de los estudios realizados desde hace muchos años (Goda, Kazizaki, Takahashi, Saintflou ...) y del esfuerzo en los últimos años de países líderes en tecnología de cajones como Japón, o la propia Comunidad Europea, que financió el proyecto PROVERBS, la investigación aplicada del comportamiento, diseño y optimización de diques verticales todavía tiene un largo camino que recorrer.

También hay que destacar el empleo que en la actualidad están empezando a tener cajones convencionales con cámaras disipadoras del oleaje, especialmente diseñadas para mejorar las condiciones de agitación frente al dique, y del que el dique exterior a Isla Verde, en el Puerto de Algeciras, es un buen ejemplo.

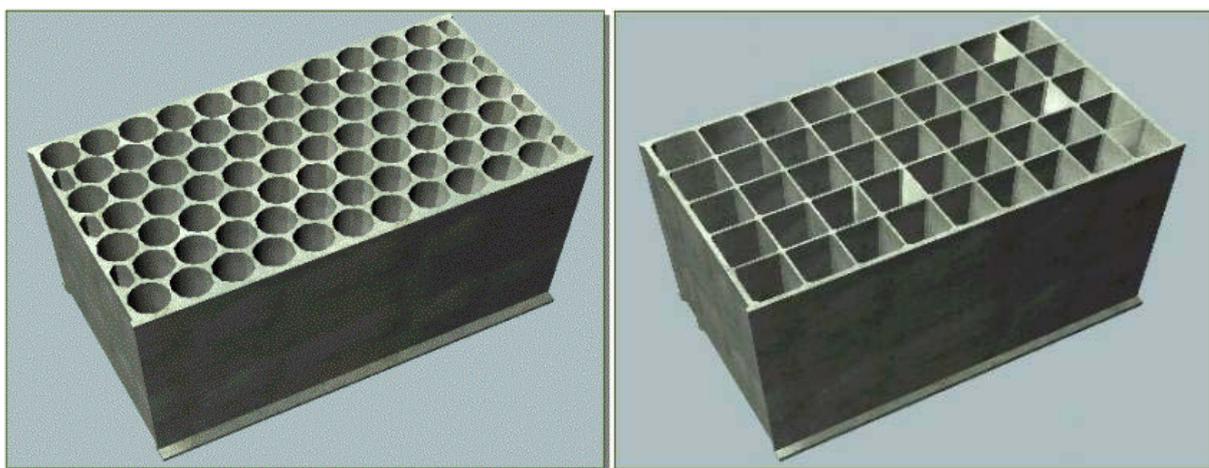
### Descripción de los cajones portuarios

Un cajón portuario es un gran bloque de hormigón armado con huecos y estanco al agua, con capacidad de flotar, y que fondeado sobre una banqueta de escollera preparada para tal fin en el lecho marino, permite la alineación de varias unidades, quedando su parte superior (coronación) emergida del agua.

La creación de un acceso desde tierra permite el paso de camiones que rellenan los huecos (celdas), de material granular (gravas, tierras y/o arenas). Esto le suministra el peso necesario para resistir las acciones de cálculo, tanto operacionales como medioambientales.

Posteriormente se procede al hormigonado de una losa de hormigón sobre la coronación, y de un espaldón en caso de que su función sea la de dique. Sobre ellos se habilitan los medios necesarios para las operaciones portuarias a las que esté encaminada la obra: galerías de servicios, grúas, defensas de atraque de barcos, puntos de amarre, etc.

En la figura 1.1 se aprecian dos tipos de estos cajones en función de la forma de sus celdas interiores.



**Fig. 1.1.** Tipología de cajones de hormigón

Uno de los objetivos de este proyecto es optimizar la respuesta de estas estructuras frente a la acción del oleaje de manera que pueda reducirse el volumen de material (hormigón y rellenos) necesarios.

Por otra parte, España es un país de referencia en la generación de energía hidroeléctrica y se ha convertido en un país puntero en el campo de la energía eólica.

Dentro del campo de la energía hidroeléctrica, un sector con un enorme interés es el de la extracción de energía del oleaje. Lo cierto es que la idea no es nueva: la primera patente de energía de las olas se realizó en Francia, si bien no fue hasta principios de los años 70 del pasado siglo cuando surgieron proyectos financiados por empresas y gobiernos como los de Japón y Reino Unido. Sin embargo, el lento desarrollo de la tecnología y los enormes costes fueron paralizando unos proyectos que han resurgido en los últimos cinco años.

Cada vez más gobiernos y empresas, apoyados en los recientes avances tecnológicos, invierten en este tipo de energía, concienciados de que las energías renovables pueden ser de gran ayuda para evitar los problemas de contaminación y escasez de recursos energéticos.

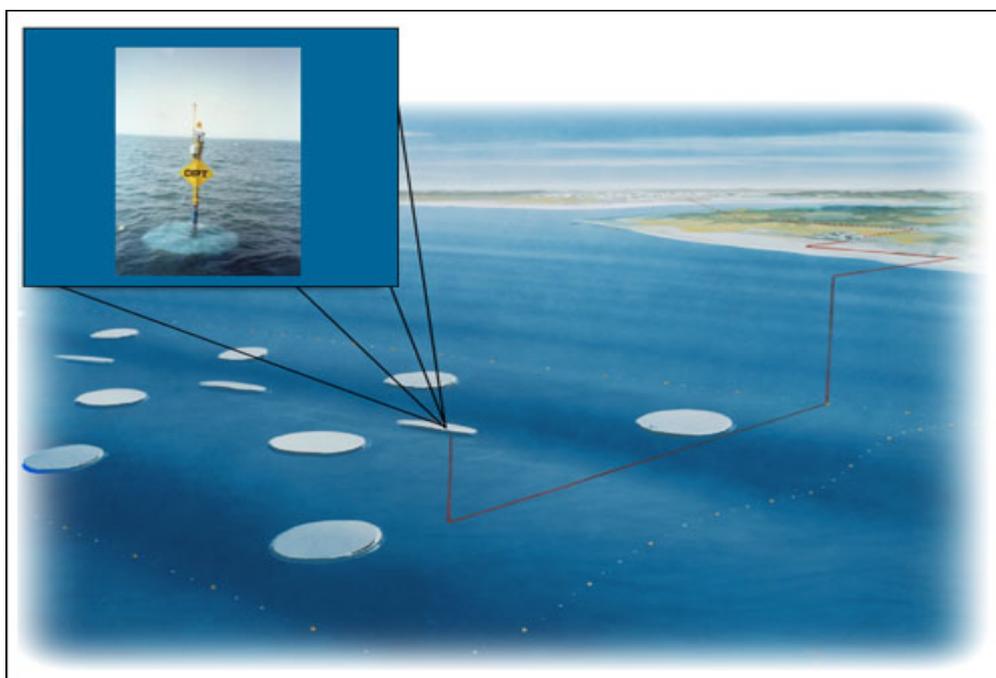
A lo largo de los últimos años se han desarrollado diferentes métodos para la extracción de energía del agua del mar como los que se muestran a continuación, aunque en este estudio se considerará la extracción de energía mediante turbinas de fondo o mediante pistones dependiendo de la geometría considerada.

Como ejemplos de este tipo de instalaciones proyectadas en diferentes localizaciones de la costa de la península ibérica se tienen las siguientes:

- *Extracción de energía del oleaje mediante boyas eléctricas*

En este caso, la planta se ubicará a unos dos kilómetros de la costa y estará compuesta por diez boyas con baliza de unos siete metros de diámetro, que ocuparán una superficie de unos 2.000 metros cuadrados. Cada prototipo estará anclado al fondo marino a una profundidad de alrededor de 50 metros. La idea es utilizar esta experiencia para instalar más centrales eléctricas de este tipo en distintos puntos del Cantábrico.

La tecnología de esta energía se basa en el aprovechamiento de la oscilación de las olas (de uno a cinco metros) mediante una boya, anclada al suelo, a la que van incorporados unos motores que se deslizan por el mástil y que transforman el movimiento provocado por las olas en energía eléctrica tal como muestra la figura 1.2.



**Fig. 1.2.** Sistema de la generación de la onda de PowerBuoy™ del OPT mediante “una boya discreta” de alta mar.

El agua entra y sale de la bomba con el movimiento e impulsa un generador que produce la electricidad. La corriente se transmite a tierra a través de un cable submarino. La planta de Santoña proporcionará electricidad para 1.500 hogares de la localidad cántabra.

El PowerBuoy™ se realiza con los sensores que supervisan continuamente el funcionamiento de los varios subsistemas y del ambiente circundante del océano. En el acontecimiento de ondas próximas muy grandes, el sistema desconecta automáticamente. Cuando las alturas de onda vuelven al normal, el sistema vuelve a conectar y recomienza la conversión y la transmisión de la energía.

Sin embargo, este método ha sido puesto en duda por ecologistas y pescadores, puesto que advierten que no se conoce el efecto que dichas boyas de energía mareomotriz y sus plantas pueden tener sobre la migración de los peces.

- *El sistema Pelamis*

En Portugal, Enersis, principal promotor portugués de energías renovables, tiene previsto instalar en el puerto de Peniche, al norte del país, una central de generación de electricidad a partir de la energía de las olas (figuras 1.3 y 1.4), utilizando el sistema Pelamis de la firma Escocesa OPD (Ocean Power Delivery LTD).

En un primer paso se van a instalar tres máquinas "Pelamis" de 750 kW, que generarían la electricidad equivalente a las necesidades de unos 6.000 habitantes. La primera de las máquinas se instalará próximamente, a unos 5 Km de la costa de Póvoa de Varzim.

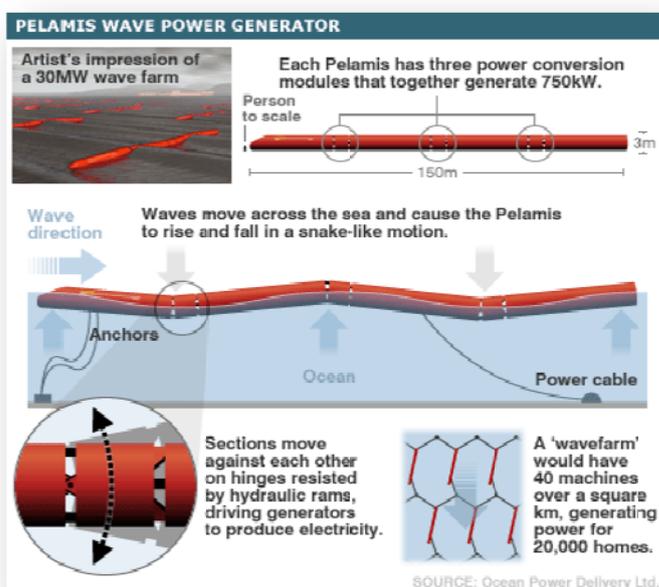


Fig. 1.3 y 1.4. Sistema Pelamis

El sistema Pelamis es el primer convertidor de energía de las olas a escala comercial, consiste en una estructura semisumergida y articulada formada por cilindros ligados mediante uniones tipo bisagra con unas dimensiones de 50 metros de largo por 3,5 metros de perímetro.

- *El sistema OWC, Oscillating Water Column*

El funcionamiento de una instalación OWC es sencillo e inocuo para el entorno. Cuando llega una ola, la lámina de agua asciende por el interior de las cámaras comprimiendo el aire que hay en el interior y expulsándolo a través de una pequeña apertura superior. Esto hace que el aire comprimido salga a gran velocidad, provocando el giro de las turbinas. Por tanto, es el propio aire comprimido el que acciona las turbinas.

Cuando la lámina de agua desciende crea un vacío en el interior de la cámara succionando aire a través de la apertura superior, impulsando nuevamente las turbinas, que giran en el mismo sentido independientemente de si el aire es expulsado o succionado tal y como muestran las figuras 1.5 y 1.6.

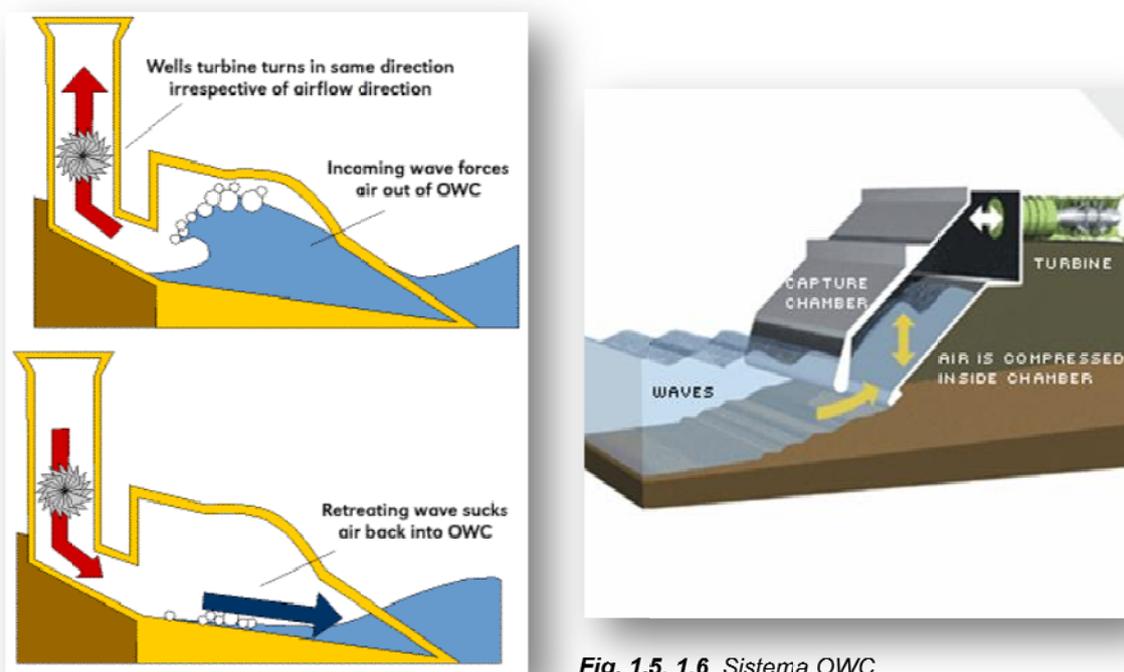


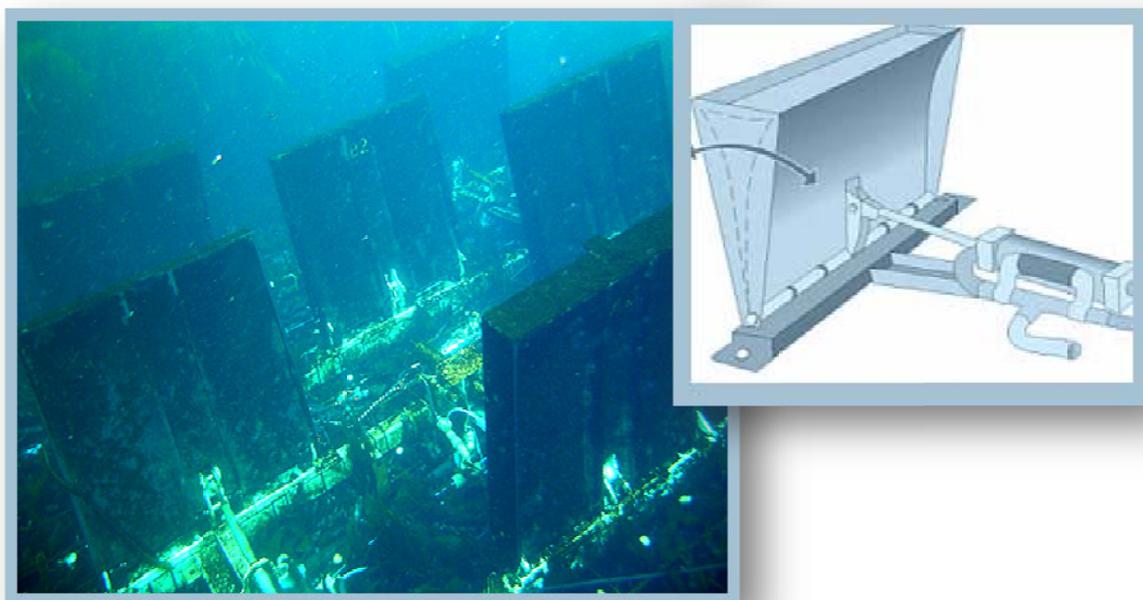
Fig. 1.5, 1.6. Sistema OWC

- *Sistema de láminas pendulares invertidas*

Es en principio uno de los sistemas que mejor se adaptan a la una de las geometrías estudiadas en esta tesina, ya que su modo de funcionamiento aprovecha el fenómeno que se pretende conseguir como resultado de la acción de la lámina pendular.

Cuando llega una ola, la oscilación de las laminas provoca la activación de del sistema de pistones sumergidos conectados a la misma, extrayendo de esta forma la energía del oleaje tal y como se muestra en las figuras 1.7 y 1.8.

En la presente tesina se han analizado dos geometrías distintas en el caso de simular un dique láminas invertidas, en una de ellas se sitúa el centro de rotación en el fondo del canal mientras que en la otra se propone desplazar dicho centro hacia una cota superior, tal y como se muestra en el capítulo 3.



**Fig. 1.7, 1.8.** Sistema de láminas invertidas

### 1.5.- Objetivos de la tesina

El objetivo de esta tesina es estudiar el comportamiento un dique vertical de cajones con láminas pendulares como sistema de amortiguación del oleaje incidente de manera que se cree un movimiento oscilante del agua en la piscina interior de forma controlada y continua reduciendo las mayores solicitaciones y , al mismo tiempo, disminuyendo los volúmenes de material necesario, su coste y el impacto ambiental.

Por otra parte, se estudiará la posibilidad de generar energía eléctrica en episodios de oleaje para lo cual se dispondrá de una serie de turbinas de fondo que aprovecharían las corrientes inducidas en el caso de un sistema con péndulo directo, o de pistones sumergidos en el caso de tratarse de un sistema de láminas pendulares invertidas.

Así, el nuevo dique cumpliría con la misión principal de protección del puerto frente a los temporales y, por otro lado, el propio dique hace de soporte estructural de un sistema de extracción de energía del oleaje.

El sistema de extracción de energía que se plantea inicialmente es un sistema similar al OWC (Oscillating Water Column) mostrado anteriormente, donde la propia corriente de agua bajo el dique pendular accionaría las turbinas, o el sistema de láminas inversas.

En resumen, los objetivos generales de este proyecto son:

- El diseño de un nuevo tipo de dique vertical de cajones con láminas pendulares para la amortiguación del oleaje.
- El análisis del comportamiento hidrodinámico y resistente del cajón.
- Aprovechamiento de la energía del mar para convertirla en eléctrica mediante el método propuesto.

Los objetivos específicos del estudio mediante simulación numérica son:

- Mejorar los conocimientos sobre el desfase existente entre las fuerzas de impacto y las presiones máximas.
- Establecimiento de una formulación de cálculo para la predicción de las cargas y estabilidad de este tipo de sistemas formados por cajones y láminas pendulares.
- Optimizar la geometría del cajón para la disipación parcial de energía del oleaje dentro de la cámara entre paredes de cajones y laminas mediante varios mecanismos como la turbulencia, la viscosidad o la resonancia.

### **1.6.- Contexto**

Esta tesina forma parte de un proyecto cooperativo iniciativa de un consorcio de empresas cuyo objetivo es desarrollar un dique con las características citadas anteriormente.

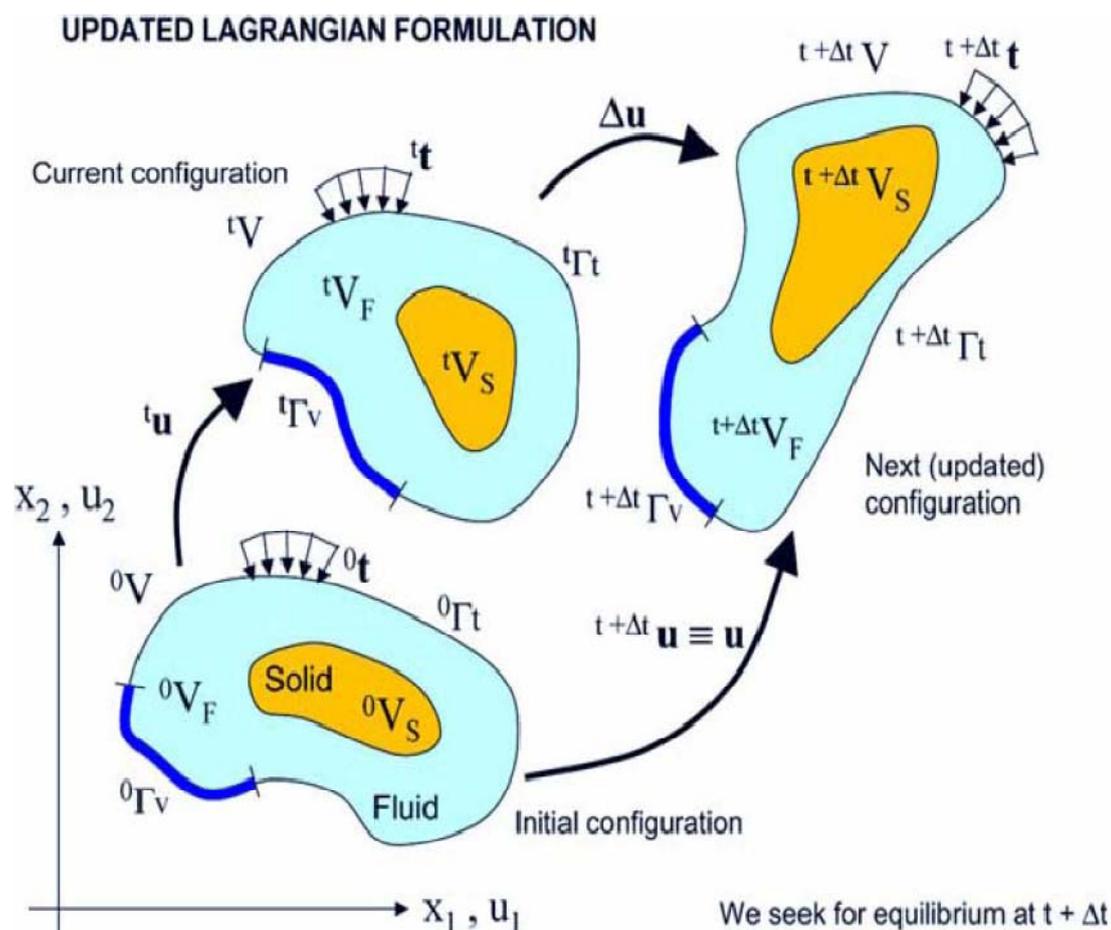
El consorcio de empresas está formado por:

- DRAGADOS S.A. y FPS como empresas constructoras con gran experiencia en obras marítimas, y que se encuentran a la cabeza de su sector en la investigación y desarrollo de nuevos tipos de cajones, como demuestran los variados proyectos de I+D en este campo acometidos en los últimos años.
- El Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) como centro especializado en modelos y en métodos numéricos de la UPC.
- El Instituto de Hidrodinámica Aplicada, (INHA), PYME tecnológica (INHA) especializada en estudios de ingeniería y ensayos a escala de temas hidrográficos y marítimos.
- URBASER como empresa de servicios medioambientales del grupo ACS que cuenta con diversas instalaciones de generación eléctrica en régimen especial a partir del tratamiento de residuos y con una Dirección de Energía que tiene entre sus objetivos el desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito de las energías renovables.

## Capítulo 2. Bases del método de elementos finitos para partículas

### 2.1.- Introducción al método de los elementos finitos para partículas (PFEM).

En el presente capítulo se describen las generalidades, características y ventajas del método de los elementos finitos y de partículas (PFEM) para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.



**Figura 2.1.1.** Descripción lagrangiana actualizada de un medio continuo con dominios fluido y sólido.

Se considera un dominio que contiene subdominios de fluido y de sólido. El flujo del medio fluido interactúa con los contornos del sólido, introduciendo al mismo tiempo la correspondiente deformación del sólido. De igual forma, la presencia del contorno sólido afecta al desarrollo del movimiento del fluido. Por lo tanto, el problema está totalmente acoplado.

El PFEM utiliza, tanto para el subdominio fluido como para el sólido, la formulación lagrangiana actualizada.

Es decir, se conocen los valores de todas las variables en la configuración actual en el instante  $t$ . Se pretende entonces calcular el nuevo conjunto de variables en ambos subdominios en la configuración actualizada en el instante  $t + \Delta t$  (figura 2.1.1).

El método de los elementos finitos se usa para resolver las ecuaciones de continuidad en los dos subdominios. Consecuentemente, se genera una malla para discretizar estos dominios y resolver las ecuaciones que gobiernan el problema mediante el método de los elementos finitos estándar. Hay que recordar que, tanto los nodos de fluido como los de sólido, son partículas materiales, y se registra su evolución a lo largo del tiempo.

Cabe recordar que a cada una de las partículas se la trata como a un punto material caracterizado por la densidad del dominio al que pertenece. Consecuentemente, la masa de un dominio se obtiene a partir de la integración de la densidad a lo largo del dominio de estudio.

Tal y como pasa en el método de los elementos finitos estándar, la calidad de la solución obtenida depende de la discretización del problema. En este sentido, es posible utilizar mallas adaptativas con el objetivo de mejorar la solución en las zonas en las que se producen grandes desplazamientos de fluido o de sólido.

## 2.2.- Algoritmo básico del PFEM

El punto de partida en cada paso de tiempo es una nube de puntos en los subdominios de fluido y de sólido. Por ejemplo,  ${}^n C$  representa la nube de puntos en el instante  $t = t_n$  (véase figura 2.2.1).

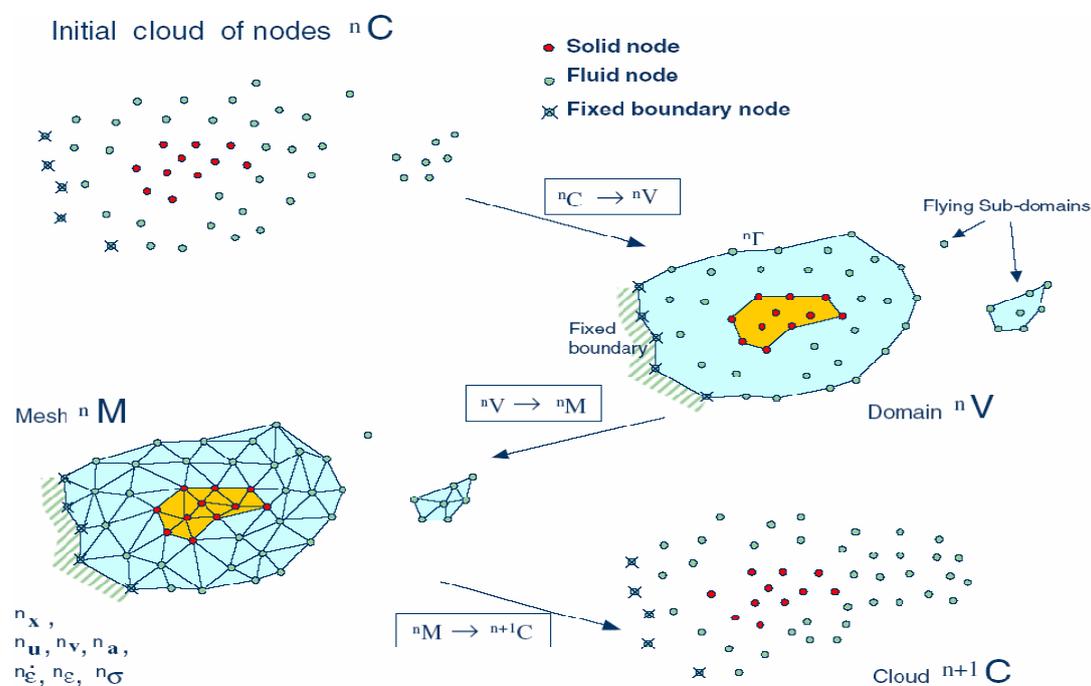


Figura 2.2.1.

Secuencia de pasos para actualizar los nodos desde el tiempo  $n$  ( $t = t_n$ ) al  $n+1$  ( $t = t_n + \Delta t$ ).

1. Identificar los contornos de fluido y de sólido que definen los dominios  ${}^nV$  a analizar. Una correcta identificación de contornos es fundamental, ya que algunos contornos, como por ejemplo la superficie libre del fluido, pueden cambiar mucho en un paso de tiempo. Para determinar los contornos se utiliza el método Alpha Shape (sección 2.8).

2. Discretizar los subdominios de fluido y de sólido con una malla de elementos finitos  ${}^nM$ . En todos los casos expuestos en la presente tesina se utilizan tetraedros generados a partir de un esquema basado en el método de Delaunay (sección 2.7), Idelsohn [5] y [6].

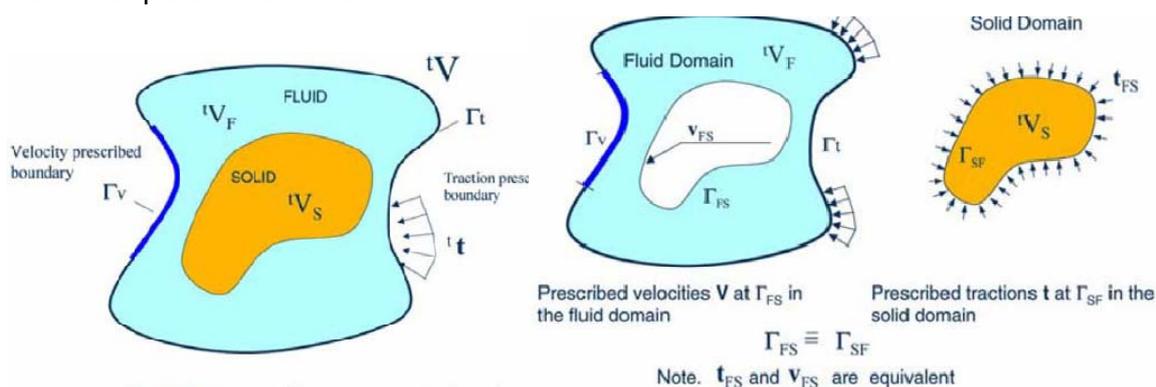
3. Resolver las ecuaciones lagrangianas acopladas del movimiento para los dominios sólido y líquido. Se calculan las variables de estado relevantes en ambos dominios en la configuración en el siguiente paso de tiempo ( $t + \Delta t$ ): velocidades, presiones y tensiones viscosas en el fluido y desplazamientos, tensiones y deformaciones en el sólido (sección 2.3).

5. Mover los nodos de la malla a la nueva posición  ${}^{n+1}C$ , donde  $n+1$  denota el instante de tiempo  $t_n + \Delta t$ . Este paso es una consecuencia del proceso de solución del paso 4.

6. Volver al paso 1 y repetir el proceso de resolución para el siguiente paso de tiempo.

### 2.3.- Descripción del algoritmo de interacción acoplada fluido-estructura (FSI)

La figura 2.3.1 muestra un dominio  $V$  con contornos externos  $\Gamma_v$  y  $\Gamma_t$  donde se prescriben las condiciones de velocidad y de tensiones superficiales respectivamente. El dominio  $V$  está formado por subdominios de fluido ( $V_F$ ) y de sólido ( $V_S$ ). Ambos subdominios interactúan a lo largo de un contorno  $\Gamma_{FS}$ , donde las variables cinemáticas (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) y las tensiones superficiales son idénticas para los dos subdominios.



**Figura 2.3.1.** Partición del dominio de análisis  $V$  en subdominios de fluido y de sólido. Existe compatibilidad de tensiones y de las variables cinemáticas en la interficie entre los dos subdominios.

Cabe constatar que el flujo en lámina libre es un caso particular del problema, donde el contorno de fluido es variable. Definimos  ${}^tS$  y  ${}^tF$  como el conjunto de variables que definen los campos cinemáticos y de tensión – deformación en los dominios sólido y fluido respectivamente. Por ejemplo:

$${}^tS = [{}^t x_s, {}^t u_s, {}^t v_s, {}^t a_s, {}^t \varepsilon_s, {}^t \sigma_s, \dots]^T \quad (2.1)$$

$${}^tF = [{}^t x_F, {}^t u_F, {}^t v_F, {}^t a_F, {}^t \dot{\varepsilon}_F, {}^t \sigma_F, \dots]^T \quad (2.2)$$

donde  $x$  es el vector de coordenadas,  $u$ ,  $v$  y  $a$  son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$  y  $\sigma$  son los vectores de deformaciones, velocidad de deformación y el vector de tensiones de Cauchy respectivamente. En el problema discretizado, una barra sobre los mismos indicará los valores nodales.

El problema de FSI acoplado de la figura 2.3.1 se resuelve mediante el siguiente esquema conceptual:

1. Se supone que las variables de los dominios sólido y fluido ( ${}^tS$  y  ${}^tF$ ) son conocidas en el instante de tiempo  $t$ .
2. Resolver las variables correspondientes al dominio sólido para el instante de tiempo  $t+\Delta t$  ( ${}^{t+\Delta t}S$ ) imponiendo las correspondientes condiciones de tensiones superficiales prescritas en el contorno fluido – sólido  $\Gamma_{FS}$ .
3. Resolver las variables correspondientes al dominio fluido para el instante de tiempo  $t+\Delta t$  ( ${}^{t+\Delta t}F$ ) imponiendo las condiciones prescritas de velocidad en el contorno  $\Gamma_v$  y de tensiones superficiales en  $\Gamma_{FS}$  y  $\Gamma_t$ .
4. En caso de alcanzar la convergencia en el contorno  $\Gamma_{FS}$ , fin del algoritmo. En caso contrario, volver al paso 2.

Las variables del dominio sólido  ${}^{t+\Delta t}S$  se determinan a partir de la integración de las ecuaciones dinámicas de movimiento en la región sólida:

$$M_s a_s + g_s - f_s = 0 \quad (2.3)$$

donde  $M_s$ ,  $g_s$  y  $f_s$  representan la matriz de masa, el vector de fuerza nodal interior y el vector de fuerza nodal exterior respectivamente. La integración temporal de la ecuación (2.3) se realiza mediante el método de Newmark estándar. Si se desea incluir efectos de no linealidad material o geométrica se utiliza un esquema incremental iterativo, Zienkiewicz [7].

La solución de las variables en el dominio de fluido incompresible mediante el método de los elementos finitos implica resolver las ecuaciones de conservación de momento y la de incompresibilidad. En el PFEM se utiliza una estabilización del método de los elementos finitos basada en el cálculo de los incrementos finitos (FIC), que permite usar una aproximación lineal tanto para la velocidad como para la presión, Oñate [8]. En el siguiente apartado se expone la formulación del problema incorporando el FIC/FEM.

## 2.4.- Formulación FIC/FEM para un fluido incompresible

Las ecuaciones infinitesimales estándar para un fluido viscoso incompresible se pueden escribir, utilizando una descripción lagrangiana, de la siguiente forma:

Balance de momento:

$$r_{m_i} = 0 \quad \text{en } V_F \quad (2.4)$$

Balance de masa:

$$r_d = 0 \quad \text{en } V_F \quad (2.5)$$

donde:

$$r_{m_i} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - b_i, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (2.6)$$

$$r_d = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad i, j = 1, n_d \quad (2.7)$$

En las ecuaciones anteriores,  $n_d$  es el número de dimensiones espaciales,  $v_i$  es la velocidad a lo largo del  $i$ -ésimo eje global ( $v_i = \partial u_i / \partial t$ , siendo  $u_i$  el  $i$ -ésimo desplazamiento),  $\rho$  es la densidad (constante) del fluido,  $b_i$  son las fuerzas de masa,  $\sigma_{ij}$  son las tensiones totales dadas por  $\sigma_{ij} = s_{ij} - \delta_{ij} p$ ,  $p$  es la presión absoluta (compresiones definidas positivas) y  $s_{ij}$  son las tensiones viscosas, relacionadas con la viscosidad  $\mu$  mediante la expresión:

$$s_{ij} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{ij} - \delta_{ij} \frac{1}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (2.8)$$

donde  $\delta_{ij}$  es la delta de Kronecker. La velocidad de variación de la tensión de deformación,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ , es:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.9)$$

Las variables de las ecuaciones anteriores están definidas en el paso de tiempo  $t$  (configuración actual). Se considera el convenio estándar de índices repetidos a menos que se especifique lo contrario.

Las ecuaciones de conservación de momento y de masa se reescriben de la forma siguiente utilizando la formulación de FIC, Oñate y García [3]:

Balance de momento:

$$r_{m_i} - \frac{1}{2} h_j \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_j} = 0 \quad \text{en } V_F \quad (2.10)$$

Balance de masa:

$$r_d - \frac{1}{2} h_j \frac{\partial r_d}{\partial x_j} = 0 \quad \text{en } V_F \quad (2.11)$$

La definición del problema se completa con las siguientes condiciones de contorno:

$$n_j \sigma_{ij} - t_i + \frac{1}{2} h_j n_j r_{m_i} = 0 \quad \text{en } \Gamma_t \quad (2.12)$$

$$v_j - v_j^p = 0 \quad \text{en } \Gamma_v \quad (2.13)$$

y la condición inicial  $v_j = v_j^0$  para  $t = t_0$ .

En las ecuaciones (2.12) y (2.13),  $t_i$  y  $v_j^p$  son las tensiones superficiales y las velocidades prescritas en los contornos  $\Gamma_t$  y  $\Gamma_v$  respectivamente y  $n_j$  son las componentes del vector unitario normal al contorno.

Las  $h_i$  en las ecuaciones anteriores son las longitudes características del dominio donde se aplica el balance del momento y la masa. En la ecuación (2.9) estas longitudes definen el dominio donde se impone el equilibrio de las condiciones de contorno de tensiones superficiales. Los detalles que llevan a la obtención de las ecuaciones (2.10 – 2.13) se encuentran en Oñate [8].

Las ecuaciones (2.10 – 2.13) son el punto de partida para la obtención de métodos de elementos finitos estabilizados para la resolución de las ecuaciones de Navier – Stokes para fluidos incompresibles mediante una formulación lagrangiana usando igual orden de interpolación para la velocidad y las variables de presión, Idelsohn [9].

#### 2.4.1.- Transformación de la ecuación de balance de masa

El término subrayado de la ecuación (2.11) puede expresarse en términos de las ecuaciones de conservación de momento. La nueva expresión para la ecuación de balance de masa es, Oñate [2]:

$$r_d - \sum_{i=1}^{n_d} \tau_i \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_i} = 0 \quad \text{con } \tau_i = \frac{3h_i^2}{8\mu} \quad (2.14)$$

En esta etapa no es necesario conservar los términos de estabilización en las ecuaciones de conservación de momento. Estos términos son fundamentales en las descripciones eulerianas, ya que se encargan de estabilizar la solución numérica para valores altos de los términos convectivos.

En la formulación lagrangiana empleada, los términos convectivos desaparecen de las ecuaciones de conservación de balance y los términos del FIC en estas ecuaciones se utilizan para obtener la forma de la ecuación de balance de masa dada por la ecuación (2.14) y se pueden despreciar a partir de aquí. Consistentemente, los términos de estabilización son negligidos en las condiciones de contorno de Neumann (ecuación (2.12)).

La expresión final de residuos ponderados para las ecuaciones de balance de momento y de masa pueden ser escritas como:

$$\int_{V_F} \delta v_i r_{m_i} dV + \int_{\Gamma_i} \delta v_i (n_j \sigma_{ij} - t_i) d\Gamma = 0 \quad (2.15)$$

$$\int_{V_F} q \left[ r_d - \sum_{i=1}^{n_d} \tau_i \frac{\partial r_{m_i}}{\partial x_i} \right] dV = 0 \quad (2.16)$$

donde  $\delta v_i$  y  $q$  son funciones arbitrarias de ponderación, equivalentes a los campos de velocidad y presión virtuales. El cálculo de los términos residuales en la ecuación (2.16) puede simplificarse si se introduce la proyección del gradiente de presiones  $\pi_i$ , definido como:

$$\pi_i = r_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2.17)$$

Se puede expresar  $r_{m_i}$  de la ecuación (2.16) en términos de  $\pi_i$ , que pasa a ser una variable adicional. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones integrales se ve aumentado por el necesario número de ecuaciones. Esto se consigue imponiendo que el residual  $r_{m_i}$  se anula en el dominio de análisis (en un sentido estadístico). Seguidamente se procede a integrar por partes el término  $r_{m_i}$  de la ecuación (2.16) y las tensiones desviadoras y los términos de presión de  $r_{m_i}$  en la ecuación (2.15).

El sistema final de ecuaciones resulta ser entonces:

$$\int_{V_F} \left[ \delta v_i \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \delta \varepsilon_{ij} (s_{ij} - \delta_{ij} p) \right] dV - \int_{V_F} \delta v_i b_i dV - \int_{\Gamma_i} \delta v_i t_i d\Gamma = 0 \quad (2.18)$$

$$\int_{V_F} q \frac{\partial v_i}{\partial x_i} dV + \int_{V_F} \sum_{i=1}^{n_d} \tau_i \frac{\partial q}{\partial x_i} \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} + \pi_i \right) dV = 0 \quad (2.19)$$

$$\int_{V_F} \delta \pi_i \tau_i \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} + \pi_i \right) dV = 0 \quad (\text{sin sumatorio en } i) \quad (2.20)$$

con  $i, j, k = 1, n_d$ . En la ecuación (2.18)  $\delta \dot{\varepsilon}_{ij}$  son las variaciones de las deformaciones virtuales. En la ecuación (2.20),  $\delta \pi_i$  son funciones de ponderación apropiadas, y los pesos  $\tau_i$  se introducen por razones de simetría. Hay que notar que el término de contorno resultante de la integración por partes de  $r_{mi}$  en la ecuación (2.16) se desprecia ya que la influencia del mismo en la solución numérica resulta negligible.

#### 2.4.2.- Discretización en elementos finitos

Se eligen interpolaciones de igual orden  $C^0$  tanto para la velocidad como para la presión y las proyecciones del gradiente de presiones a lo largo de cada elemento con  $n$  nodos. Las interpolaciones se escriben como:

$$v_i = \sum_{j=1}^n N_j \bar{v}_i^j, \quad p_i = \sum_{j=1}^n N_j \bar{p}^j, \quad \pi_i = \sum_{j=1}^n N_j \bar{\pi}_i^j \quad (2.21)$$

donde  $(\bar{o})^j$  denota las variables nodales y  $N_j$  las funciones de forma.

Sustituyendo las aproximaciones (2.21) en las ecuaciones (2.18 – 2.20) y escogiendo el método de Galerkin con  $\delta v_i = q = \delta \pi_i = N_i$  se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones discretizadas:

$$M \dot{\bar{v}} + K \bar{v} - G \bar{p} - f = 0 \quad (2.22a)$$

$$G^T \bar{v} + L \bar{p} + Q \bar{\pi} = 0 \quad (2.22b)$$

$$Q^T \bar{p} + \hat{M} \bar{\pi} = 0 \quad (2.22c)$$

Las matrices y vectores en las ecuaciones (2.22) se ensamblan con las contribuciones elementales dadas por (para problemas bidimensionales):

$$M_{ij} = \int_{V_F^e} \rho N_i N_j dV, \quad K_{ij} = \int_{V_F^e} B_i^T D B_j dV$$

$$D = \mu \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \mu \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x_2} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x_2} & \frac{\partial N_i}{\partial x_1} \end{bmatrix}$$

$$L_{ij} = \int_{V_F^e} \tau_k \frac{\partial N_i}{\partial x_k} \frac{\partial N_j}{\partial x_k} dV, \quad Q = [Q^1, Q^2], \quad Q_{ij}^k = \int_{V_F^e} \tau_k \frac{\partial N_i}{\partial x_k} N_j dV$$

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} \hat{M}^1 & 0 \\ 0 & \hat{M}^2 \end{bmatrix}, \quad \hat{M}_{ij}^k = \int_{V_F^e} \tau_k N_i N_j dV, \quad G_{ij} = \int_{V_F^e} B_i^T m N_j dV$$

$$f_i = \int_{V_F^e} N_i b dV + \int_{\Gamma_i^e} t d\Gamma, \quad b = [b_1 \quad b_2]^T, \quad t = [t_1 \quad t_2]^T \quad (2.23)$$

para  $i, j = 1, n$  y  $k, l = 1, 2$ .

En las ecuaciones anteriores B es la matriz de variación de deformaciones y  $m = [1 \quad 1 \quad 0]^T$  para el caso bidimensional.

#### 2.4.3.- Algoritmo del paso fraccionado para las variables de fluido

El punto de partida del algoritmo iterativo son las variables en el dominio fluido  ${}^n F$  para el paso de tiempo  $n$ . El objetivo es hallar las variables en el tiempo  $n+1$ ,  ${}^{n+1} F$ . Por razones de claridad, se obvia el índice izquierdo superior  $n+1$  en todas las variables:

$${}^{n+1} \bar{x} \equiv \bar{x}, \quad {}^{n+1} \bar{p} \equiv \bar{p}, \quad {}^{n+1} \bar{\pi} \equiv \bar{\pi} \quad (2.24)$$

Un algoritmo iterativo simple se obtiene separando la presión de las ecuaciones de balance de momento de la siguiente forma:

$$\bar{v}^* = {}^n \bar{v} - \Delta t M^{-1} [K \bar{v}^j - G^n p - f] \quad (2.25)$$

$$v^{j+1} = \bar{v}^* + \Delta t M^{-1} G \delta \bar{p} \quad (2.26)$$

donde  $\delta \bar{p}$  denota un incremento de presión.

En las ecuaciones precedentes y las posteriores, el índice superior-izquierdo  $n$  se refiere a los valores en la configuración actual  ${}^nV_F$ , mientras que el índice derecho  $j$  denota el número de iteraciones para cada paso de tiempo.

$$G^T \bar{v}^* + \Delta t S \delta \bar{p} + L \bar{p}^{j+1} + Q \bar{\pi}^j = 0 \quad (2.27a)$$

Donde

$$S = G^T M^{-1} G \quad (2.27b)$$

Típicamente, la matriz  $S$  se calcula usando la matriz diagonal  $M=M_d$ , donde el subíndice  $d$  denota a partir de este momento una matriz diagonal.

Una alternativa es aproximar la matriz  $S$  por una matriz laplaciana. Esto reduce considerablemente el ancho de banda de  $S$ . La desventaja de este último método es que el incremento de presiones se ha de prescribir en la superficie libre del fluido, y esto reduce la precisión en el cumplimiento de la condición de incompresibilidad en estas regiones.

De esta manera se obtiene el esquema semi-implícito que se describe a continuación. Para cada iteración:

1. Calcular  $v^*$  de la ecuación (2.25) con  $M = M_d$ . Para la primera iteración  $(\bar{v}^1, \bar{p}^1, \bar{\pi}^1, \bar{x}^1) = ({}^n \bar{v}, {}^n \bar{p}, {}^n \bar{\pi}, {}^n \bar{x})$

2. Calcular  $\delta \bar{p}$  y  $\bar{p}^{j+1}$  de la ecuación (2.27a) como:

$$\delta \bar{p} = -(L + \Delta t S)^{-1} [G^T \bar{v}^* + Q \bar{\pi}^j + L \bar{p}^j] \quad (2.28a)$$

La presión  $\bar{p}^{n+1,j}$  se calcula de la siguiente forma:

$$\bar{p}^{j+1} = \bar{p}^j + \delta \bar{p}^j \quad (2.28b)$$

3. Calcular  $\bar{v}^{j+1}$  de la ecuación (2.26) con  $M=M_d$ .

4. Calcular  $\bar{\pi}^{j+1}$  de la ecuación (2.22c) como:

$$\bar{\pi}^{j+1} = -\hat{M}_d^{-1} Q^T \bar{p}^{j+1} \quad (2.29)$$

5. Actualizar las coordenadas de la malla de nodos. De la definición de velocidades  $v_i = \partial u_i / \partial t$  se deduce:

$$x_i^{j+1} = {}^n x_i + \bar{v}_i^{j+1} \Delta t \quad (2.30)$$

Comprobar la convergencia de los campos de presión y velocidad. Si se cumplen las condiciones de convergencia exigidas, desplazarse al siguiente paso de tiempo. En caso contrario, volver al paso 1 para realizar la siguiente iteración con  $j \leftarrow j + 1$ .

Hay que constatar que en la resolución de los pasos 1, 3 y 4 no es estrictamente necesario resolver un sistema de ecuaciones, ya que se han escogido matrices diagonales para M y  $\hat{M}$ .

En los casos expuestos en la presente tesina, el incremento del paso de tiempo se ha elegido como

$$\Delta t = \min(\Delta t_i) \quad , \quad \text{con} \quad \Delta t_i = \frac{h_i^{\min}}{|v|} \quad (2.31)$$

donde  $h_i^{\min}$  es la distancia entre el nodo i y su correspondiente nodo de la malla más cercano.

Adicionalmente, para controlar que el coste computacional no resulte excesivo, o que el paso de tiempo sea demasiado grande, en los casos expuestos en la tesina se toman las siguientes limitaciones:  $0.01 \leq \Delta t \leq 0.1s$ .

Aunque no se ha comentado explícitamente, todas las matrices y vectores de las ecuaciones (2.27 – 2.31) se calculan en la configuración actualizada  ${}^{n+1}V_F$ . Esto significa que el dominio de integración cambia para cada paso de tiempo y, por lo tanto, todos los términos que incluyen derivadas espaciales se han de actualizar para cada iteración. Un método alternativo es referir el dominio de integración para cada paso de tiempo a la configuración actual  ${}^n V_F$ . Para ello se necesita la matriz jacobiana para transformar las derivadas  ${}^{n+1}V_F$  espaciales y el diferencial de volumen de  ${}^n V_F$  en cada iteración.

Las condiciones de contorno se aplican de la siguiente manera: no se aplican condiciones para el cálculo de la velocidad fraccional  $\bar{v}^*$  de la ecuación (2.25), las velocidades prescritas al contorno se aplican cuando se resuelve  $\bar{v}^{j+1}$  en el paso 3.

## 2.5.- Esquema escalonado para el problema FSI

La solución para las variables del problema en los dominios fluido y sólido en la configuración actualizada,  ${}^{n+1}F$  y  ${}^{n+1}S$ , se calculan mediante el esquema escalado de la figura 2.5.1.

El esquema siguiente, denominado versión “fuerte”, se recomienda para problemas de un gran número de sólidos interactuando con las partículas de fluido.

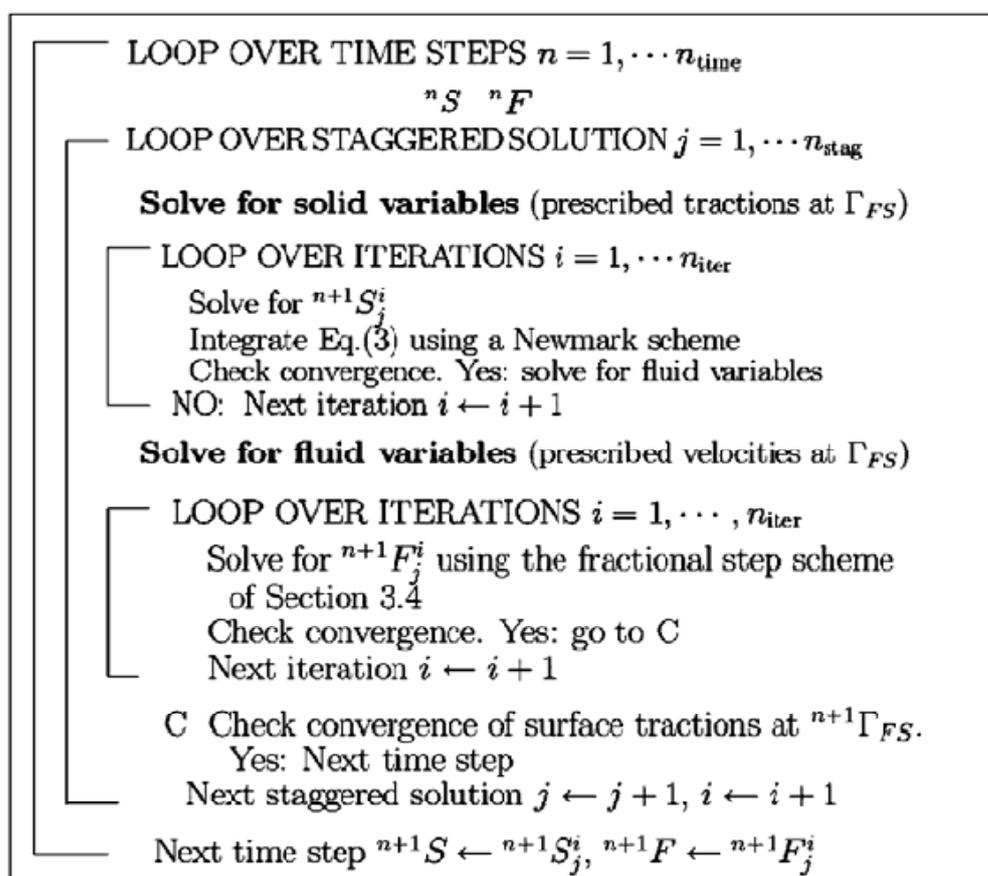


Figura 2.5.1. Esquema para el problema FSI

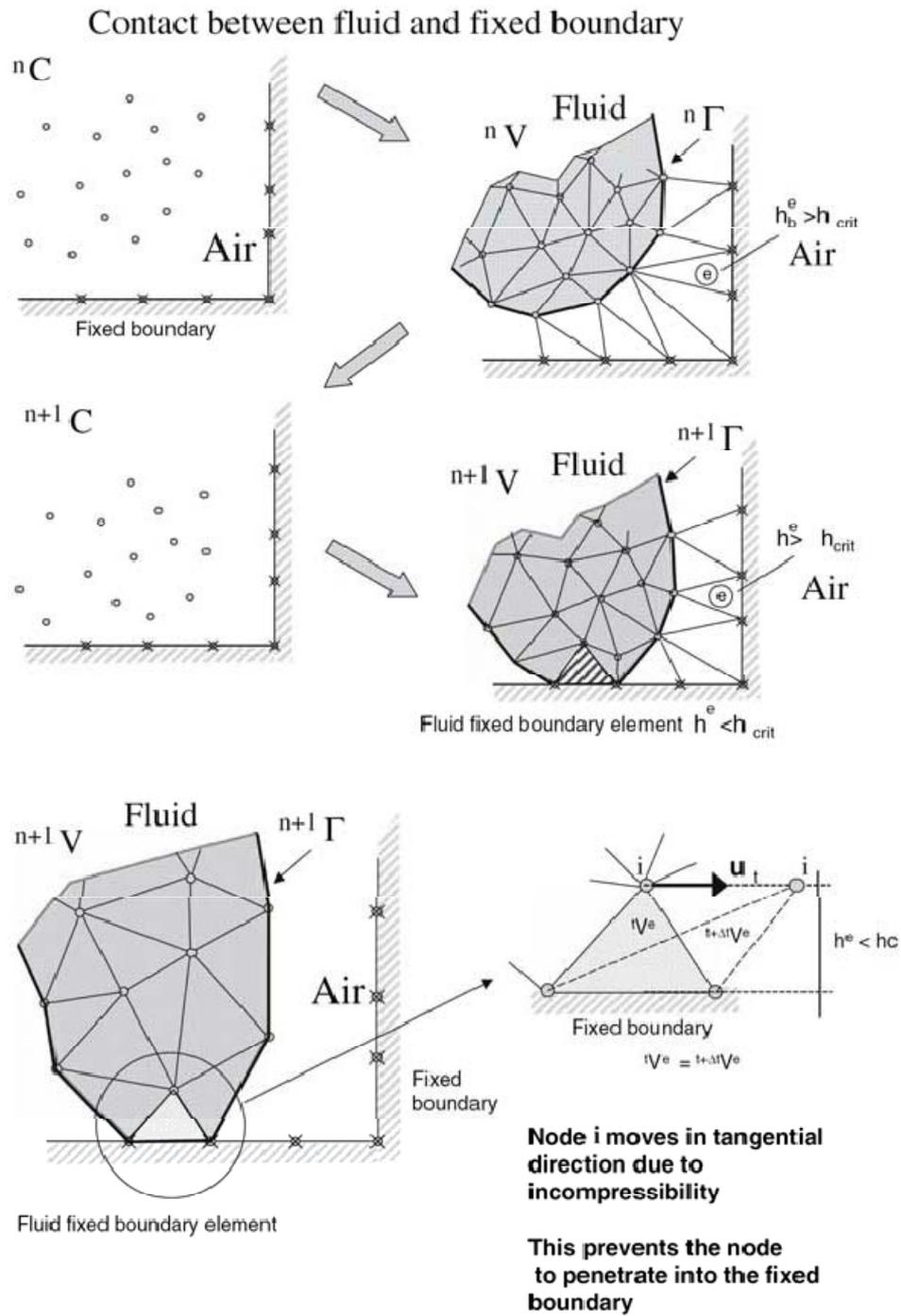
## 2.6.- Tratamiento del contacto entre fluido y sólido

El movimiento del dominio sólido está gobernado por la acción de las fuerzas del flujo de fluido inducidas por la presión y las tensiones viscosas que actúan en la superficie de sólido.

Los contornos sólidos pueden ser fijos o pueden pertenecer a sólidos en movimiento. En el PFEM, la condición de velocidades prescritas a los contornos fijos se aplica en los nodos del contorno en la forma fuerte.

El contacto entre las partículas de fluido y los contornos fijos también incluye la condición de incompresibilidad, que permite prevenir la penetración de los nodos de fluido dentro del contorno de sólido (véase figura 2.6.1).

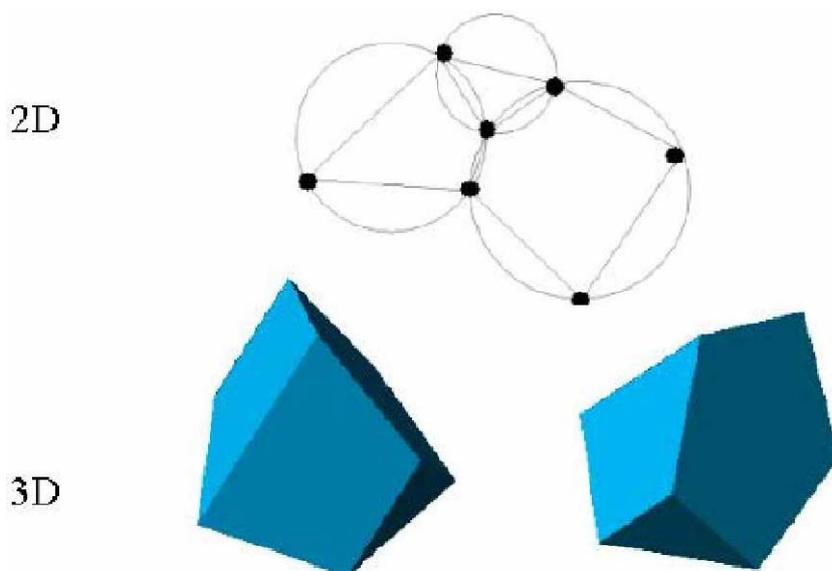
Esta manera simple de tratar el contacto entre sólido y fluido es una de las ventajas del PFEM.



**Figura 2.6.1.** Tratamiento de la condición de contacto entre la interfaz de fluido y sólido (pared).

## 2.7.- Generación de una nueva malla

Uno de los puntos fuertes de la formulación del PFEM es la rápida regeneración de la malla en cada paso de tiempo a partir de la posición de los nodos. El PFEM utiliza la denominada *extended Delaunay tessellation* (EDT). La EDT permite generar mallas no estándar combinando elementos de formas poliédricas arbitrarias (triángulos, cuadriláteros y otros polígonos en 2D así como tetraedros, hexaedros y poliedros en 3D) con un coste computacional de orden  $n$ , donde  $n$  es el número total de nodos de la malla (figura 2.7.1).



**Figura 2.7.1.** Generación de mallas no estándar combinando diferentes polígonos (en 2D) y poliedros (en 3D) usando la técnica EDT.

Las funciones continuas  $C^0$  de cada elemento se pueden obtener con la denominada interpolación de elementos finitos sin malla (MFEM). Los detalles de la generación de las funciones de forma MFEM pueden encontrarse en Idelsohn [5].

## 2.8.- Identificación de las superficies de contorno

Uno de los factores importantes del PFEM es la correcta identificación del contorno de los dominios. A veces, los nodos de contorno están explícitamente definidos del resto de nodos. No obstante, en otros casos, la única información disponible es la posición del conjunto de nodos, por lo que es necesario un algoritmo para definir el contorno.

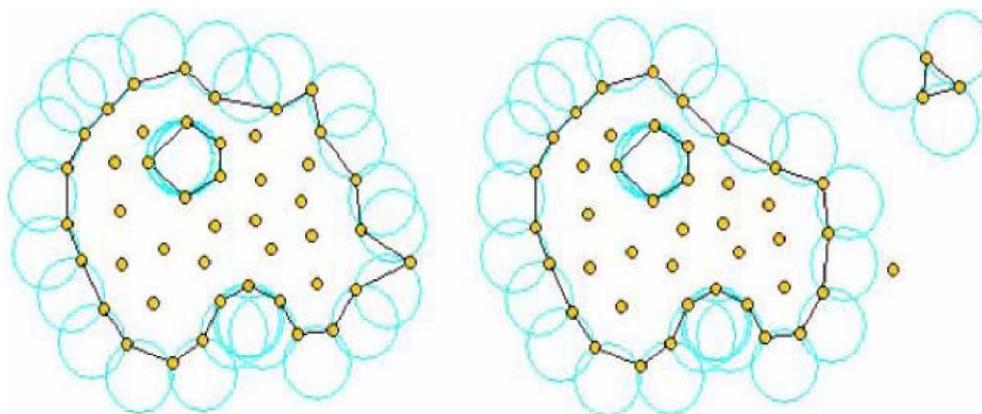
La partición *extended Delaunay* facilita el reconocimiento de los nodos de contorno. Suponiendo que los nodos siguen una distribución  $h(x)$ , donde  $h(x)$  es la distancia mínima entre dos nodos, se sigue el criterio siguiente: todos los nodos que pertenecen a la superficie de una esfera vacía de radio superior a  $\alpha h$  se consideran nodos de contorno. En la práctica,  $\alpha$  es un parámetro mayor que la unidad, pero cercano a ella. Este criterio es coincidente con el concepto de Alpha Shape.

La figura 2.8.1 muestra un ejemplo de reconocimiento de contorno mediante la técnica anterior.

Una vez definidos los contornos de los dominios, los vectores normales al contorno quedan definidos automáticamente por las superficies poliédricas (o polígonos en problemas bidimensionales) de los elementos finitos.

La definición de los contornos permite realizar el cálculo del volumen de cada uno de los subdominios. Con el criterio propuesto, el error que se comete en la detección del contorno es proporcional a  $h(x)$ . La magnitud de este error es aceptable.

El método descrito también permite identificar partículas de fluido aisladas del subdominio de fluido. Estas partículas se tratan como parte del contorno externo, y por tanto, se les prescribe la condición de presión atmosférica (figura 2.8.1).



**Figura 2.8.1.** Identificación de partículas (o grupos de partículas) aisladas del conjunto inicial de nodos.

Tal y como ya se ha comentado, cada partícula del dominio es un punto material caracterizado por la densidad del dominio fluido o sólido al cual pertenece. Cuando una partícula sale del dominio de fluido o sólido y queda aislada del conjunto de partículas del dominio de origen, este último sufre una pérdida de volumen. No obstante, este volumen se recupera cuando la partícula vuelve a incorporarse al contorno definido por el algoritmo *alpha shape*. Este concepto es esencial para el modelado, por ejemplo, de la rotura de olas superficiales.

### 2.8.1.- Contacto entre interfaces sólido-sólido

El contacto entre dos superficies de sólido se puede modelar introduciendo una capa de elementos de contacto entre las dos interfaces de sólido que interactúan en el fenómeno. Esta capa se crea automáticamente en el paso de la generación de la malla, ya que la distancia entre los nodos de las dos superficies de sólido es pequeña. Si esta distancia es menor a un cierto valor, los elementos existentes entre los dos sólidos se tratan como aire o fluido.

En caso contrario, los elementos se tratan como elementos de contacto, donde existe una relación entre las fuerzas tangencial y normal, correspondientes al desplazamiento introducido por un modelo elástico y friccional de contacto.

Se ha comprobado que el algoritmo anterior es muy efectivo y permite identificar y modelar de una manera sencilla condiciones de contacto friccional complejas entre dos o más sólidos. La precisión del modelo de contacto depende de la distancia crítica mencionada anteriormente.

La figura 2.8.2 muestra un ejemplo del algoritmo de contacto en el análisis del movimiento de un sólido rodeado de fluido.

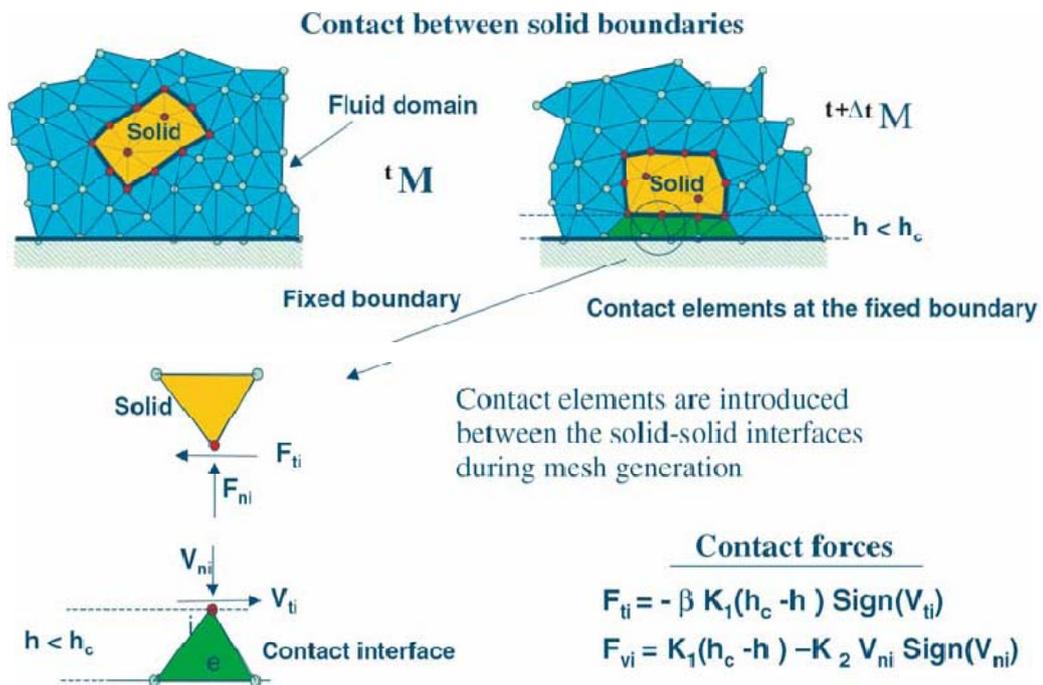


Figura 2.8.2. Condiciones de contacto entre dos interfaces de sólido.

## Capítulo 3. Modelado del sistema

### 3.1.- Estudios Propuestos

Inicialmente se proponen siete casos, con diferentes alturas de ola significativa, periodo, longitud del canal en el que se propaga el oleaje y diferentes amplitudes de la piscina o cámara interior del dique. En la tabla 3.1 se muestran los diferentes casos.

Hs (m)	Tp (s)	h (m)	L (m)	Amplitud de piscina (m)
6.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m
6.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m
4.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m
4.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m
4.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m
2.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m
2.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m

Tabla 3.1. Casos de oleaje propuestos

Siendo:

Hs, altura de ola

Tp, período de la ola

H, profundidad

L, longitud de onda de la ola

En la simulación numérica se ha considerado un canal de geometría variable, de acuerdo con la tabla 1, tal y como se especifica en la figura 3.1.1.

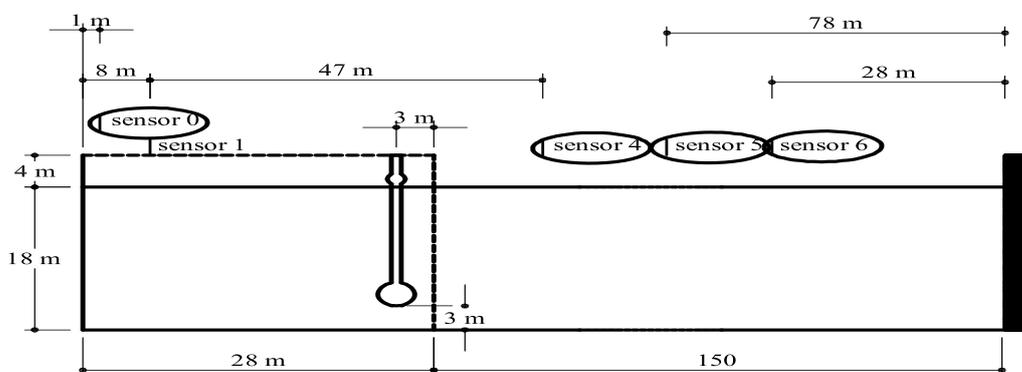
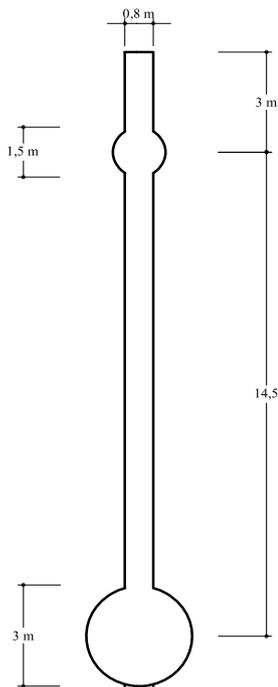


Fig. 3.1.1. Canal virtual para la simulación numérica

Se dispone un generador de olas situado en la parte derecha de la figura, un canal de desarrollo y de viaje de la ola y la lámina pendular. Por otra parte, el canal virtual dispone de varios sensores que registran la altura de ola en su posición para cada paso de tiempo.

En la figura 3.1.2, pueden verse las dimensiones del péndulo así como sus principales características. Se han estudiado diferentes modificaciones de la estructura pendular para valorar la incidencia de tales variaciones en los resultados.

La principal característica analizada es el período propio del péndulo en oscilación libre. Es de señalar que el período propio de oscilación libre del péndulo representado en la figura es de 7,3 segundos.

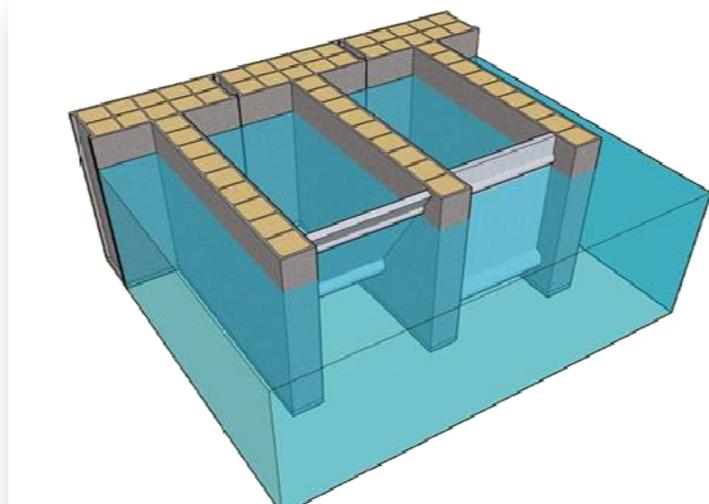


Características del péndulo directo

Módulo de elasticidad = 25000 MPa

Densidad de la esfera inferior = 4000Kg/m<sup>3</sup>

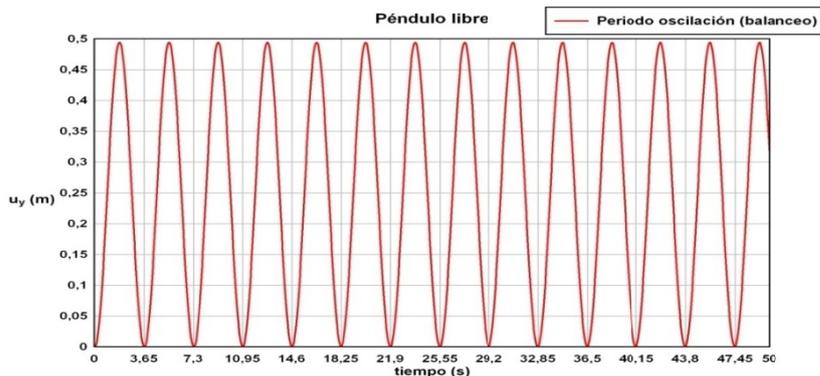
Densidad resto del péndulo = 2500Kg/m<sup>3</sup>



**Fig. 3.1.2 y 3.1.3.**

*Diseño del dique pendular.*

En la figura 3.1.4 pueden verse los movimientos del péndulo rígido y libre obtenidos utilizando un programa de elementos finitos que considera los grandes movimientos.



**Fig. 3.1.4.**

*Oscilación del péndulo*

### 3.2.- Ajustes realizados sobre geometría y condiciones de contorno

Inicialmente la longitud de canal virtual era fija, tal y como se muestra en la figura anterior. Con los primeros resultados obtenidos y dada la distorsión observada en los mismos como consecuencia de los efectos de reflexión del oleaje, se decide realizar un cambio en la geometría de los siete casos, aumentando la longitud del canal y tomando para cada caso un valor de 3,5 veces la longitud de ola correspondiente al ensayo considerado.

En la tabla siguiente se muestran los ajustes para cada uno de los ensayos:

Hs (m)	Tp (s)	h (m)	L (m)	Amplitud de piscina (m)	Longitud del canal (m)	Velocidad de Impulso del Pistón (m/s)
6.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m	532 m	1.90
6.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m	311.5 m	1.66
4.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m	532 m	1.27
4.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m	311.5 m	1.11
4.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m	192.5 m	0.92
2.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m	311.5 m	0.55
2.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m	192.5 m	0.46

**Tabla 3.2.1.** Casos de oleaje modificados

Siendo:

Hs, altura de ola

Tp, período de la ola

H, profundidad

L, longitud de onda de la ola



**Fig 3.2.1.** Geometría del dique y canal a simular.

### 3.3.- Parámetros de referencia.

Para cada uno de los casos considerados en la tabla 3.2.1 se han estudiado diferentes variables. Las más importantes son las citadas a continuación:

- *Campo de velocidades del agua en los dominios de interés.*

Principalmente en el entorno del péndulo, así como su evolución temporal. La visualización de dicho campo de velocidades y su evolución (utilizando la herramienta gráfica GiD) ha permitido conocer con exactitud el mecanismo de funcionamiento del conjunto desde el punto de vista hidrodinámico y cinemático. En la figura 3.3.1 puede verse el campo de velocidades del agua alrededor del péndulo en un instante de la simulación donde se aprecia claramente una de las zonas que serían más castigadas por la erosión en un canal real, mientras que en la figura 3.3.2 se representa la variación temporal de la velocidad en un punto concreto del dominio de interés.

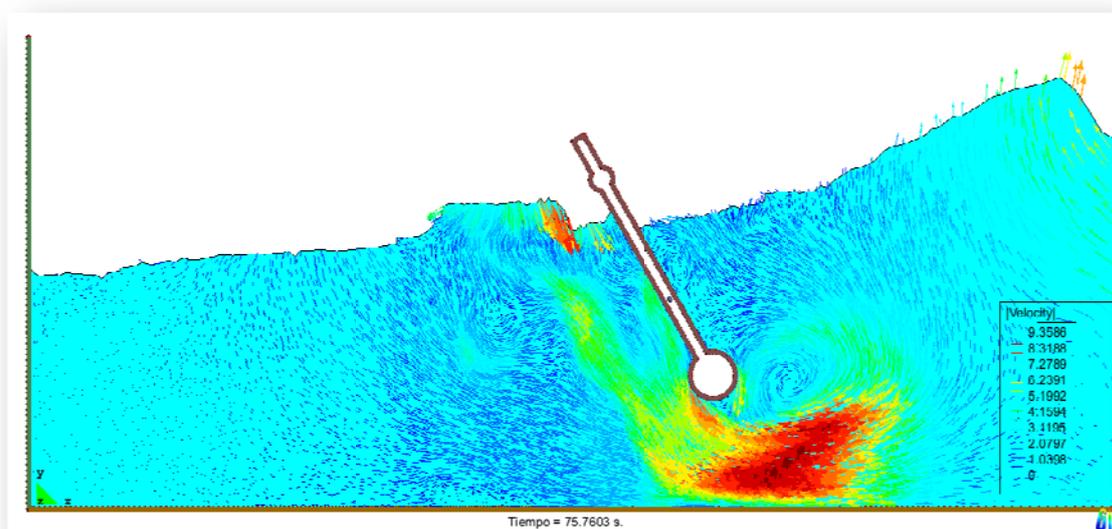


Fig 3.3.1. Campo de Velocidades en el entorno del péndulo.

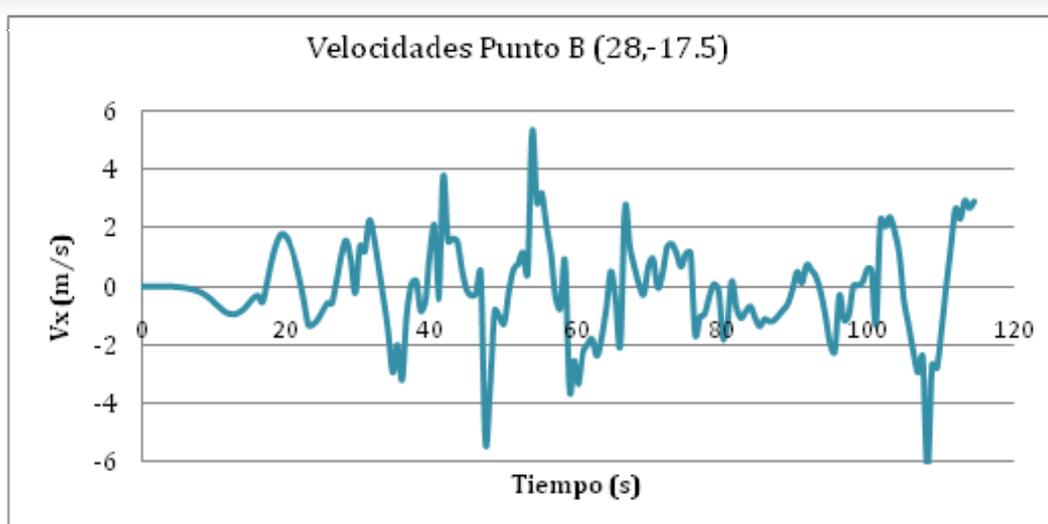
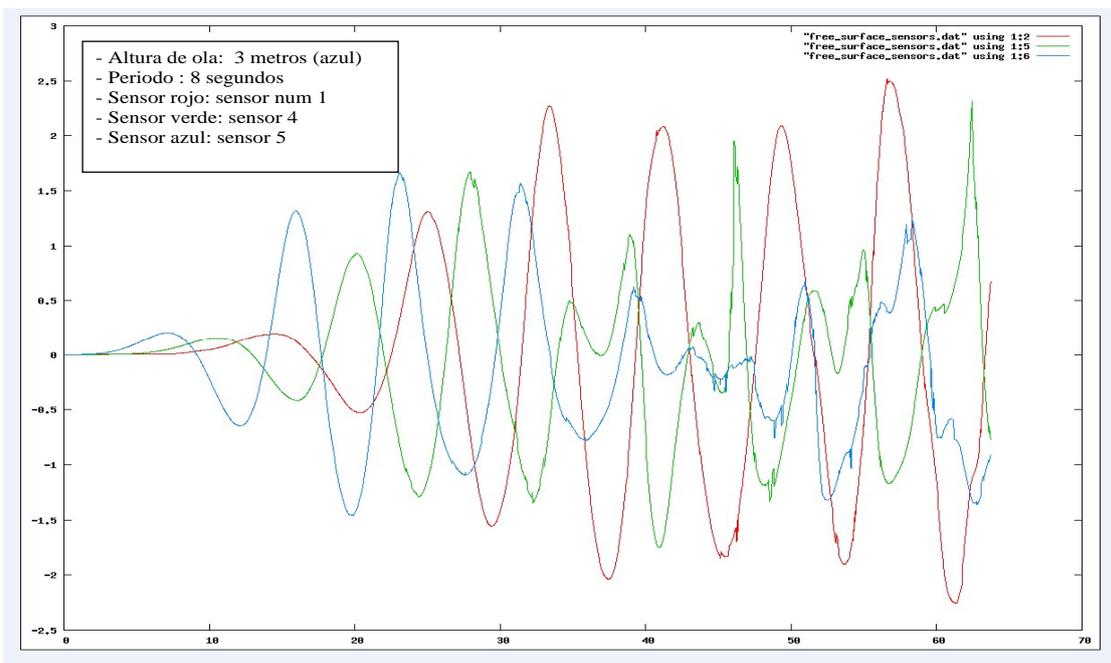


Fig. 3.3.2 Variación temporal de la velocidad en un punto cercano al fondo

- *Altura de ola en diferentes puntos de interés.*

Se ha estudiado, por otra parte, la evolución de la superficie libre del agua en diferentes secciones del canal. Las principales zonas de interés son las situadas dentro de la piscina así como en las inmediaciones del péndulo. Estas medidas son clave para poder establecer la altura de coronación en la pared de fondo de la piscina interior, verificar que el oleaje se propaga adecuadamente a lo largo del canal virtual o para decidir si se debe aumentar la altura del dique pendular y evitar que el agua sobrepase por encima dependiendo de cada caso en particular.

En la figura 3.3.3 puede verse un ejemplo de los resultados obtenidos.



**Fig. 3.3.3** Variación de la superficie libre

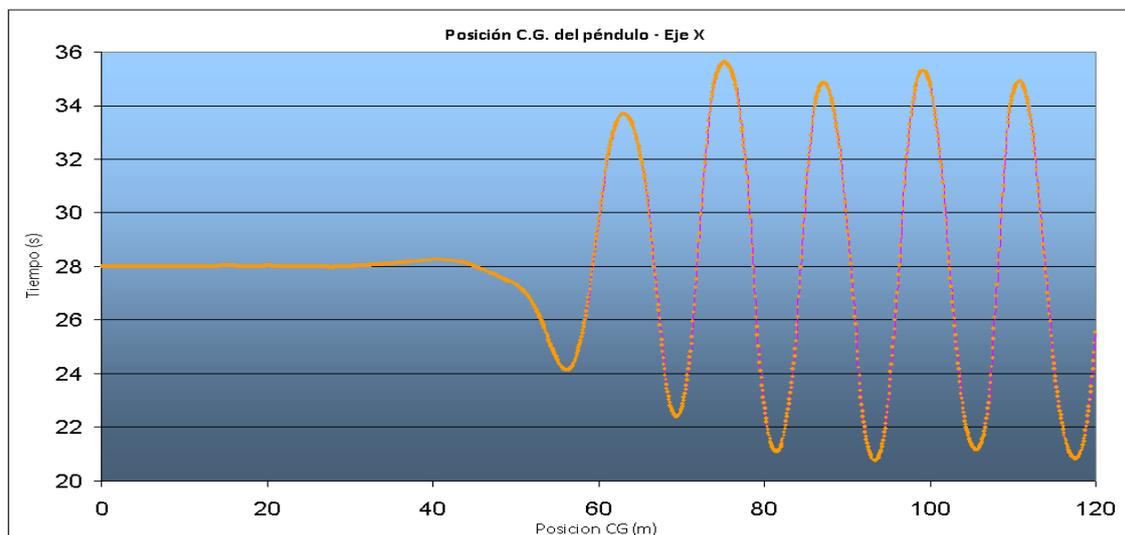
Por otra parte, la comparación de alturas de superficie libre en el interior de la piscina y delante del dique de láminas con otro caso de un canal virtual sin el dique de amortiguación de oleaje resultan de gran interés para observar los efectos de la implantación de esa obra marítima.

Los sensores de superficie situados a lo largo del canal, realizan mediciones en cada paso de tiempo de la simulación obteniendo de esa forma un perfil exacto de la evolución de la altura del agua en esa sección.

Esas mediciones pueden, en algún caso, no ajustarse bien con las mediciones que se obtendrían en un entorno cercano al sensor, por ejemplo, al romper la ola en la pared de fondo, las partículas pueden no formar un conjunto continuo de forma que si al menos una partícula o gota de agua llega a alcanzar una altura determinada en la sección de control, esa altura queda registrada como la altura de la superficie libre del agua, por esa razón se debe realizar un seguimiento adecuado y contrastar esos resultados con las animaciones obtenidas en esa zona.

- *Movimientos del péndulo y su evolución*

Un aspecto de primordial importancia es el análisis del movimiento del dique de láminas pendulares bajo las distintas condiciones de oleaje. En la figura 3.3.4 puede verse un ejemplo de salida de resultados de la variación temporal del movimiento del centro de gravedad del péndulo en uno de los ensayos.



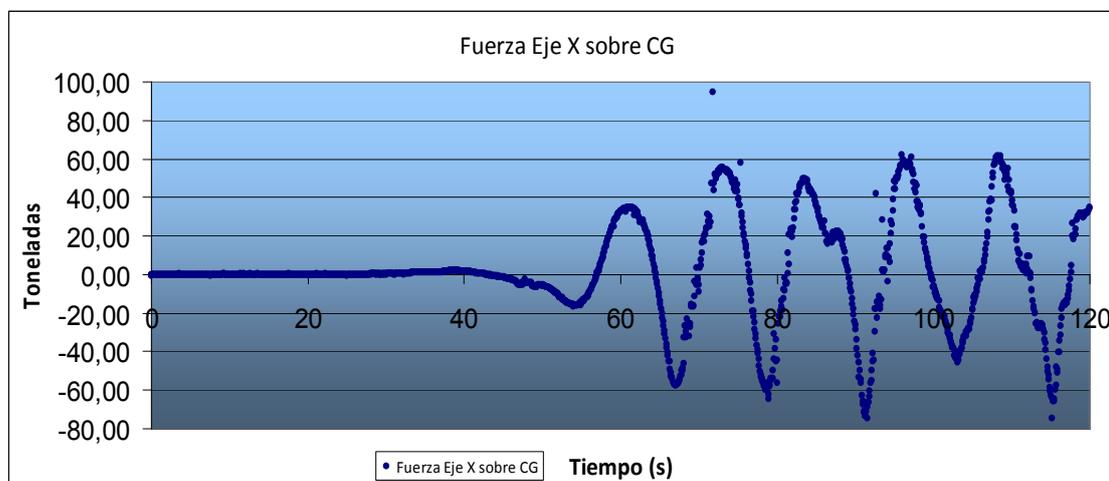
**Fig. 3.3.4** Variación temporal de la posición del CG del dique pendular - Eje x

El control de esas oscilaciones nos permite realizar una valoración inicial acerca de la viabilidad constructiva de la obra en si, y decidir si se debe modificar las características físicas del mismo como la densidad del material o su geometría.

- *Fuerzas ejercidas sobre el péndulo y sobre los diques verticales*

Se han valorado los esfuerzos principalmente sobre el dique pendular, sus efectos y la evolución de los mismos a lo largo del ensayo. Obviamente el conocimiento de tales fuerzas es importante para el correcto diseño de los diferentes elementos que configuran el sistema y para los posteriores ensayos experimentales.

En la figura 3.3.5 puede verse un ejemplo de salida de resultados:



**Fig. 3.3.5** Variación temporal de las fuerzas ejercidas sobre el dique

### 3.4.- Modificaciones de los estudios propuestos inicialmente.

Una vez analizados los resultados de los ensayos iniciales y validado el correcto funcionamiento del canal virtual y la geometría del dique, se decide estudiar diferentes variantes que introduzcan situaciones concretas que permitan acercarse cada vez más a una situación real.

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos primarios del proyecto es la posibilidad de extraer energía del oleaje incidente, se proponen las siguientes variaciones:

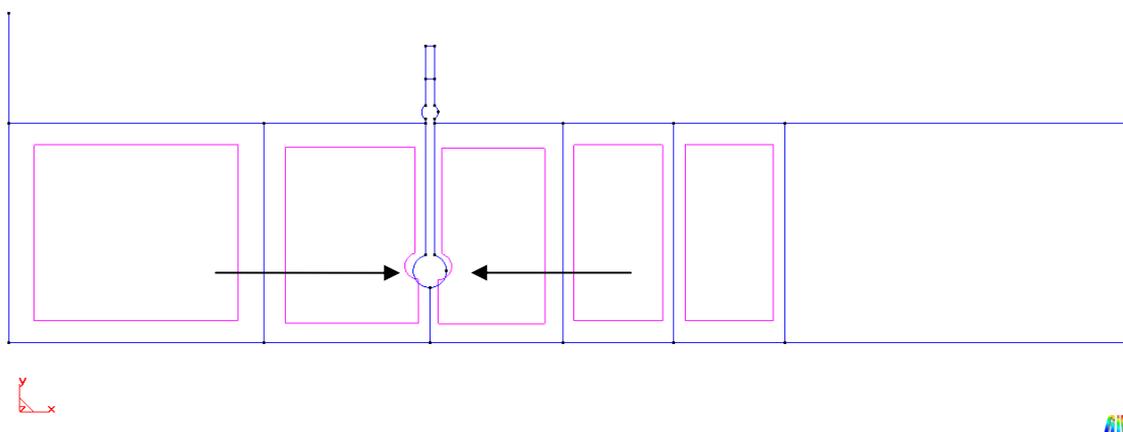
#### 3.4.1.- Modelos con Fuerza Puntual Aplicada

Una posible forma de extracción de energía es limitar o dificultar el movimiento del péndulo, como por ejemplo mediante pistones o un mecanismo hidráulico similar.

A tal efecto, se proponen varios ensayos con diferentes fuerzas aplicadas, siendo el punto de aplicación, la parte inferior del dique pendular, analizado tanto la variación en los movimientos del péndulo como los cambios que se producen en el campo de velocidades en su entorno.

Al mismo tiempo los sensores de superficie registran los cambios de altura de la superficie libre para poder, posteriormente, comparar los resultados obtenidos según la dirección y el valor de la fuerza aplicada con los datos del modelo sin fuerza aplicada.

En la figura 3.4.1 puede observarse la geometría del ensayo y la localización de las fuerzas aplicadas (Punto Q)

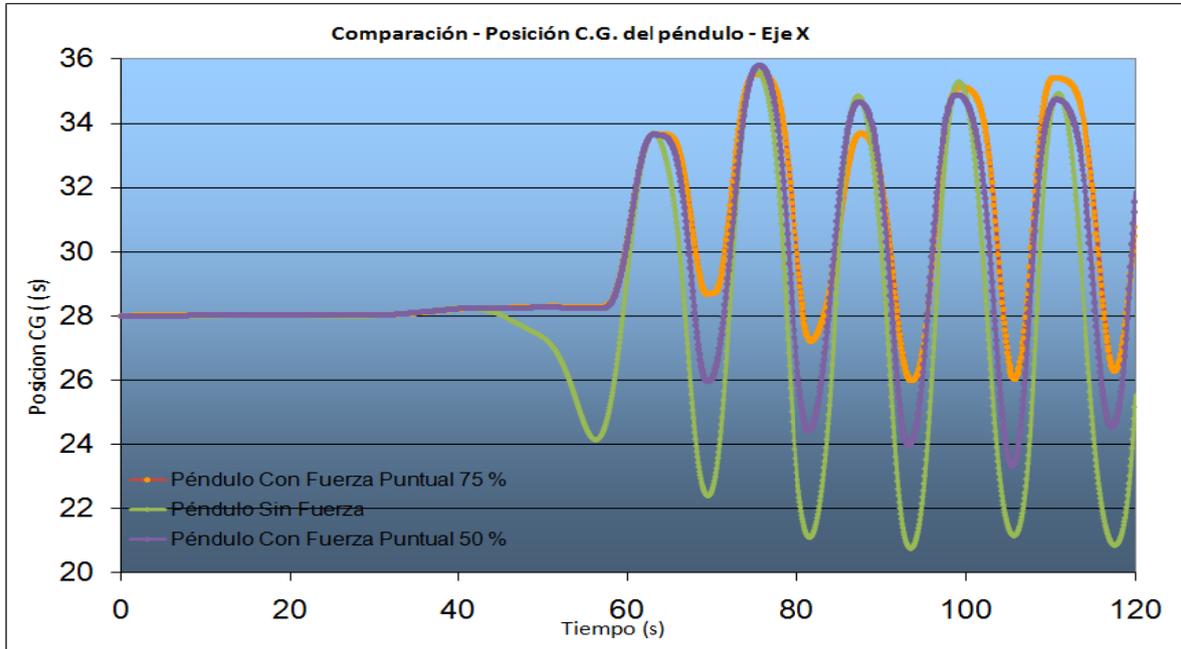


**Fig. 3.4.1.1** Geometría del modelo y punto de aplicación de la fuerza

Multiplicando la fuerza aplicada en cada uno de los casos por el desplazamiento resultante del dique pendular, se puede obtener una estimación de la cantidad de energía que se produciría al instalar algún tipo de mecanismo de extracción de energía.

Las fuerzas a aplicar se han estimado a partir de los momentos actuantes sobre el péndulo con el objetivo de contrarrestar parcialmente las oscilaciones del mismo tal y como se especifica en el capítulo siguiente.

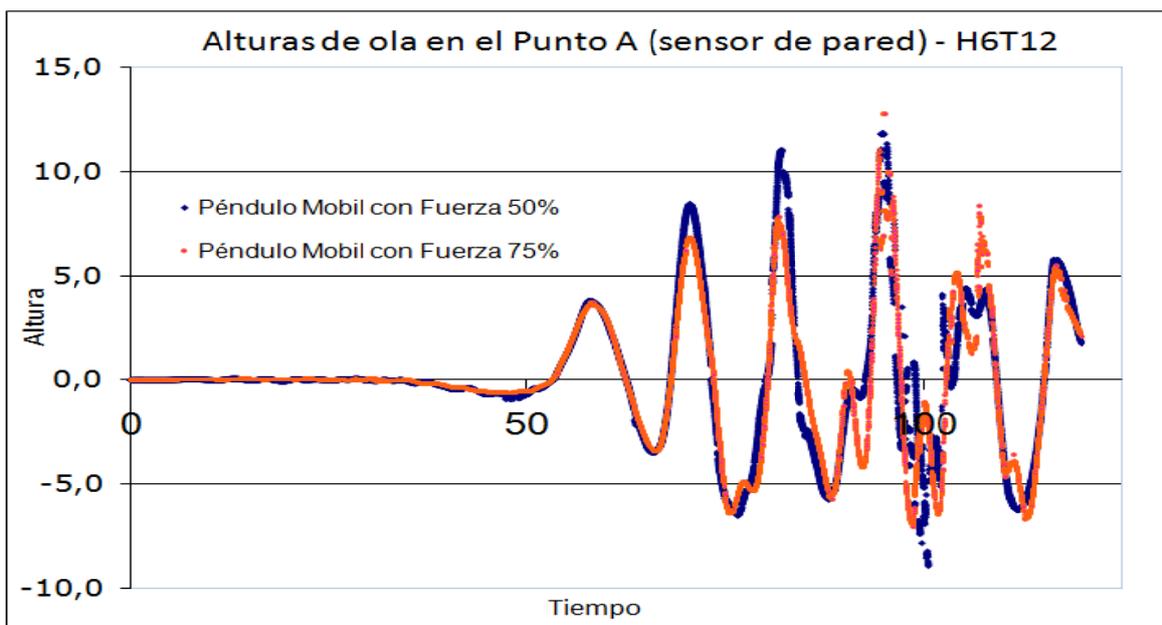
En la figura 3.4.1.2 puede verse la variación del movimiento del péndulo bajo diferentes casos de fuerza aplicada. Asimismo, en la figura 3.4.1.3 puede verse el registro de superficie libre del agua en la pared de fondo de la piscina interior en el caso de disponer de una fuerza aplicada y con el péndulo libre sin aplicar ninguna fuerza adicional.



**Fig. 3.4.1.2** Desplazamiento del dique pendular bajo diferentes casos de fuerza

En este caso las fuerzas son de valor constante tal que una fuerza puntual al 100% contrarrestaría totalmente el momento actuante del oleaje sobre el dique pendular.

En capítulos siguientes se detalla el valor y posicionamiento de esas fuerzas externas así como los efectos que provocan en el campo de velocidades de fondo, dando lugar a vórtices de disipación de energía y altas velocidades que podrían provocar erosión del fondo de canal.



**Fig. 3.4.1.3** Altura de la superficie libre en el interior de la piscina según la fuerza aplicada

### 3.4.2.- Modelos con Disipación de Energía

Con objeto de profundizar en la posibilidad de aprovechamiento de energía, se dispone una zona viscosa, virtual, entre el extremo inferior del péndulo y el fondo del canal tal y como muestra la figura 3.4.2.1.

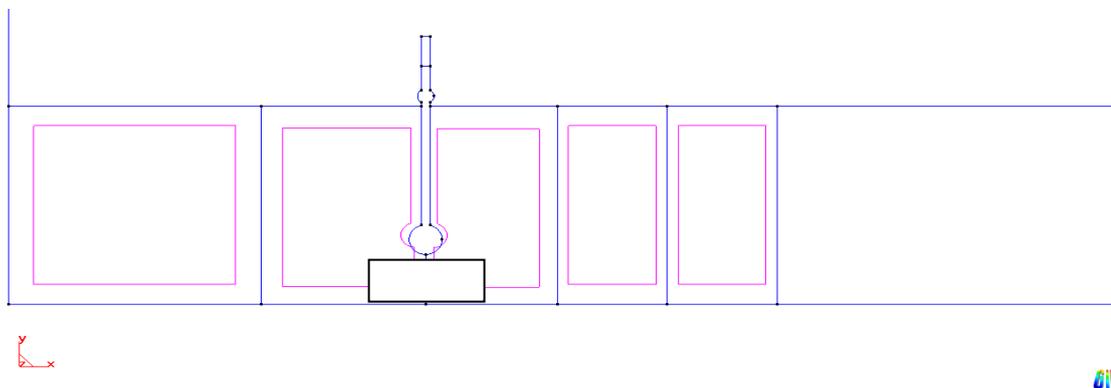


Fig. 3.4.2.1 Localización de la zona disipativa.

Esta zona pretende simular un mecanismo de extracción de energía con un principio parecido al sistema utilizado en el OWC, en nuestro caso, mediante una serie de turbinas de fondo. Esas turbinas giran siempre en el mismo sentido, independientemente de si las corrientes de agua son hacia el interior de la piscina como si son hacia el mar, optimizando de esta forma el funcionamiento del sistema.

Igual que en los casos anteriores, se analizan las variaciones de superficie libre, la distribución de presiones, los movimientos del péndulo y la producción de energía. Se ha podido demostrar la posibilidad de extracción de energía del conjunto, reduciendo además de forma considerable la altura de ola en la pared de fondo de la piscina tal y como muestran los resultados obtenidos.

En la figura 3.4.2.2 puede verse un ejemplo de los valores de altura de agua obtenidos en dicha pared.

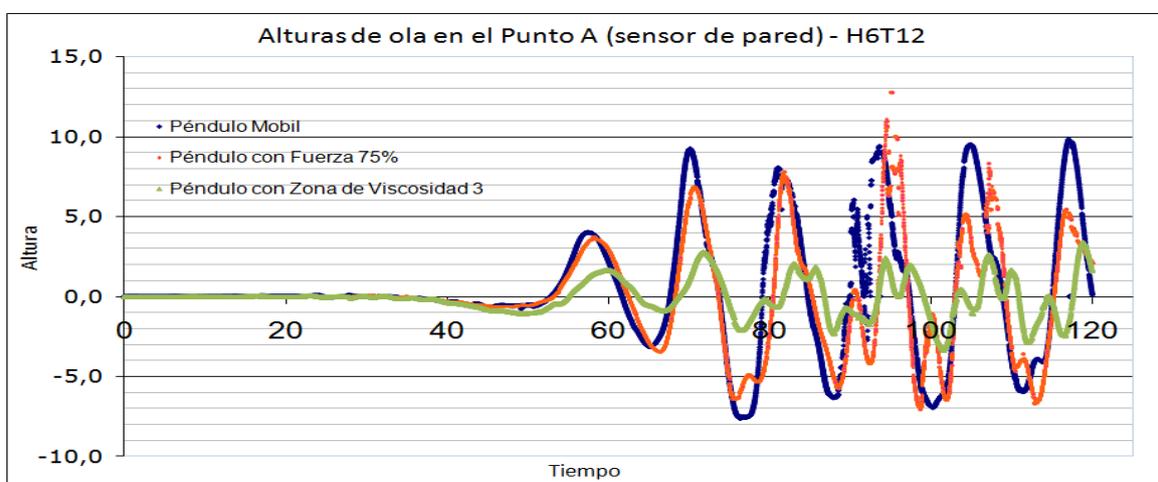


Fig. 3.4.2.2 Registros de superficie libre en el interior de la piscina en el caso viscoso

### 3.4.3.- Modelo con Péndulo Inmóvil

El estudio del péndulo fijo presenta considerable interés como punto de partida para el análisis de las condiciones de extracción de energía del sistema. Se estudian las condiciones hidrodinámicas, las fuerzas que se ejercen sobre el péndulo y la variación de la fuerza en el punto de fijación (figura 3.4.3.1).

Se observa un incremento importante de la velocidad en la parte inferior del péndulo, resultado que da paso a considerar la posible extracción de energía en esa zona. Bajo estas condiciones, se han estudiado también las variables citadas en apartados anteriores y se han comparado los resultados con los casos de péndulo libre.

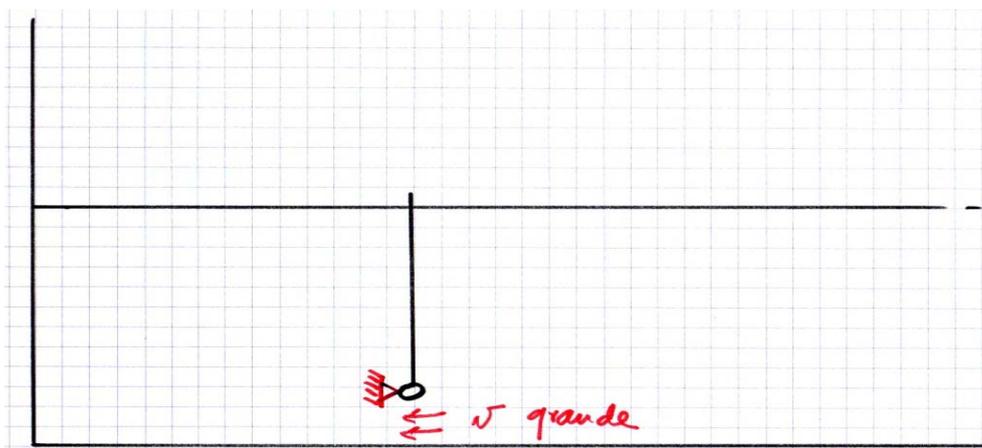


Fig. 3.4.3.1 Esquema de fijación del péndulo

### 3.4.4.- Modelo con Péndulo Invertido

La geometría y las características físicas de un dique pendular invertido son totalmente distintas a las consideradas en el dique pendular directo. Su masa y densidad deben de ser tales que permitan su flotación al tiempo que su geometría permita resistir los esfuerzos a las que se vea sometido bajo la acción del oleaje.

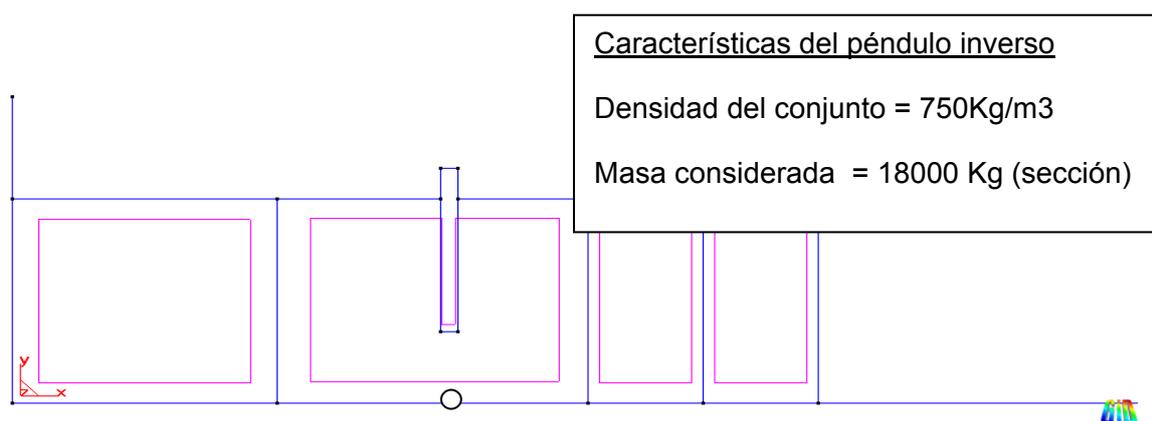


Fig. 3.4.4.1 Geometría del dique pendular invertido

Existen nuevos parámetros geométricos que se deben valorar y establecer antes de proceder con la simulación de este tipo de péndulo, algunos de ellos son:

- Decidir si dicho dique debe ser sumergido o sobresalir por encima de la cota del agua.

- La continuidad del mismo y la posibilidad de permitir que el agua circule por debajo del mismo.

Por otra parte, esta disposición es, desde un punto de vista energético, mas óptima que la considerada hasta ahora, dado que la zona donde las olas inciden con mayor intensidad se encuentra en la parte superior, lejos del punto de rotación, con lo cual se conseguiría un mayor aprovechamiento de esa energía.

Un tipo de generador, y que actualmente se encuentra en funcionamiento, es mediante pistones que absorben las oscilaciones de la lámina tal y como se citó en el capítulo 1. Elevando el centro de rotación se abre la posibilidad de instalar turbinas de fondo de la misma forma que en el péndulo directo aunque desde un punto de vista constructivo, esta geometría es mucho más factible dado que el punto de rotación se encuentra fijo y la estructura de las turbinas sirve al mismo tiempo de base de apoyo del dique.

La figura siguiente muestra el campo de velocidades obtenido en el primer ensayo con la geometría invertida:

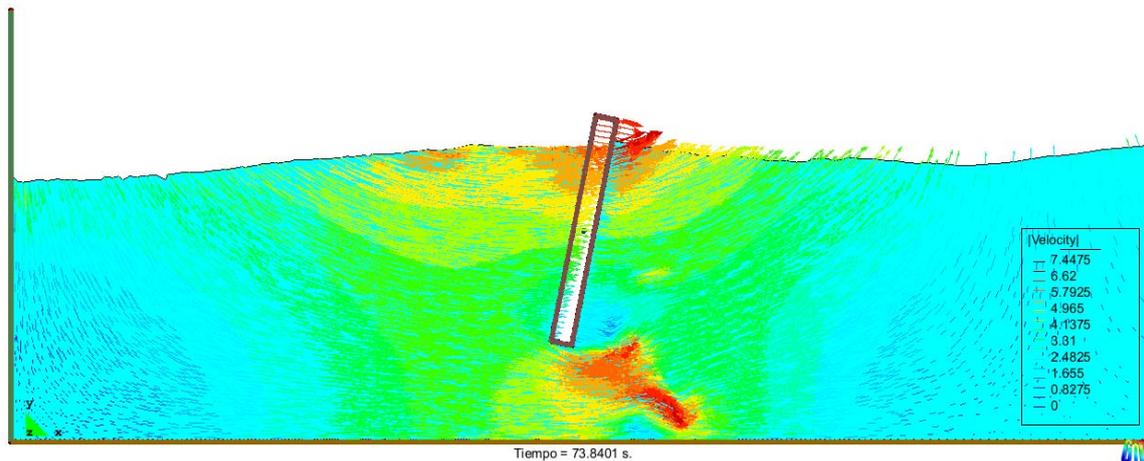


Fig. 3.4.4.2 Campo de velocidades - dique pendular inverso

*TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.*

## Capítulo 4.

### Simulación numérica y discusión de resultados

---

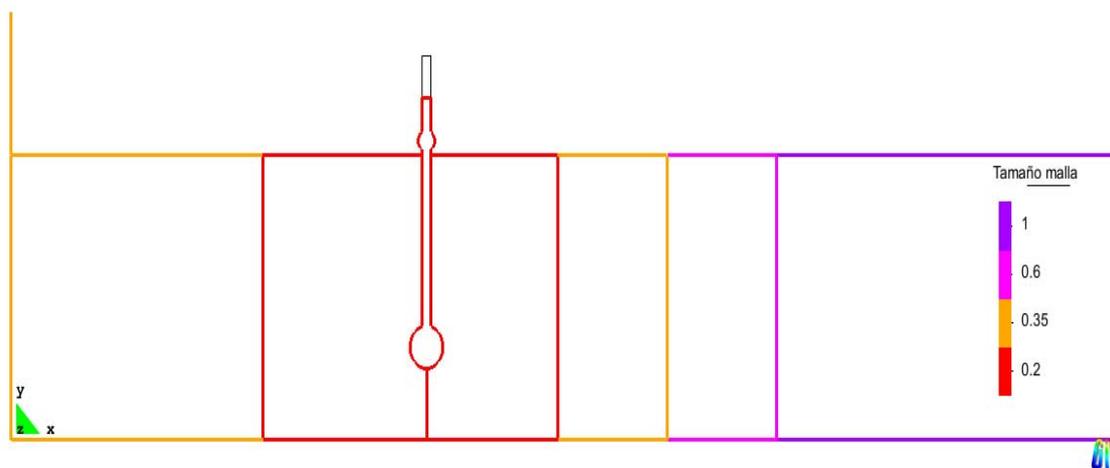
#### 4.1.- Ajustes realizados sobre mallado, geometría y condiciones de contorno.

El software utilizado en la simulación (GiD) permite ajustar el mallado por zonas y definir para cada elemento la precisión y la forma con la que queremos que el sistema malle antes de empezar con el cálculo. Por otra parte, el módulo de cálculo de elementos finitos para partículas (PFEM) requiere la introducción de todas la condiciones de contorno del problema que va a simularse y definir que resultados queremos tener disponibles en el postproceso.

Así antes de realizar cada uno de los ensayos se debe verificar:

##### 4.1.1.- Mallado

El mallado del modelo numérico, tanto en el caso del péndulo directo como en inverso, será el mismo, aumentando la precisión en las zonas del entorno del péndulo y ajustando el tamaño de la malla mayor en la longitud de propagación del oleaje desde el generador de olas hasta la zona próxima al dique, tal y como se muestra en la figura 4.4.1.1 siguiente:



**Fig. 4.4.1.1** Ajuste de mallado en la geometría

Se pueden observar las diferentes zonas dependiendo del grado de precisión requerido.

La zona alrededor del dique, desde la coordenada  $x = 13$  hasta  $x = 40$  dispone de un mallado de elementos triangulares más preciso con un tamaño de 0.2. A partir de ese punto se mantiene un mallado de 0.35 durante 10 metros hasta  $x = 50$  donde empieza el mallado de 0.60 hasta  $x = 60$ . El resto del canal de propagación hasta llegar al generador de oleaje se malla con elementos de tamaño 1 dado que no se requiere de mucha precisión en esa zona y un tamaño mayor aumentaría el tiempo de cálculo de forma considerable.

Hay que tener en cuenta que el mallado especificado en el preproceso solo sirve como aproximación inicial para iniciar el cálculo iterativo. Una vez el módulo de cálculo de elementos finitos para partículas inicia las iteraciones, este utiliza la definición de mallado por zonas definido en el propio módulo de cálculo.

Aun así, un ajuste del mallado inicial es esencial de cara a evitar problemas de concordancia de tamaños en las zonas de transición, de la misma forma que la definición de los tipos de elemento, ya sean puntos, líneas, superficies o volúmenes dependiendo de cómo queremos que el elemento en cuestión sea considerado durante la simulación.

#### 4.1.2.- Geometría y condiciones de contorno del módulo de cálculo

Con los primeros resultados se decide variar ligeramente la geometría del conjunto, no solo en la longitud del canal virtual, sino también su profundidad y la disposición del dique de laminas pendulares. Así, finalmente la profundidad del canal se define en 20 metros, situando a cota 0 la superficie libre en reposo y dejando un ancho de 5 metros entre la parte inferior del dique y el suelo de dicho canal.

Por otra parte se decide aumentar la altura de coronación del dique para evitar el rebase del agua por encima en los casos de mayor intensidad de oleaje.

Activando la interacción fluido estructura (FSI) y la conservación de volumen evitamos la distorsión de los resultados en caso de que haya pérdida de partículas, por ejemplo si estas rebasan la pared de fondo al romper la ola. Por esa misma razón definimos también una caja de contorno que englobe la totalidad del canal y que evite que las partículas que sobresalen, sigan en la simulación una vez alcanzado ese límite.

#### 4.2.- Resultados referentes a los sensores de superficie

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las fases del estudio.

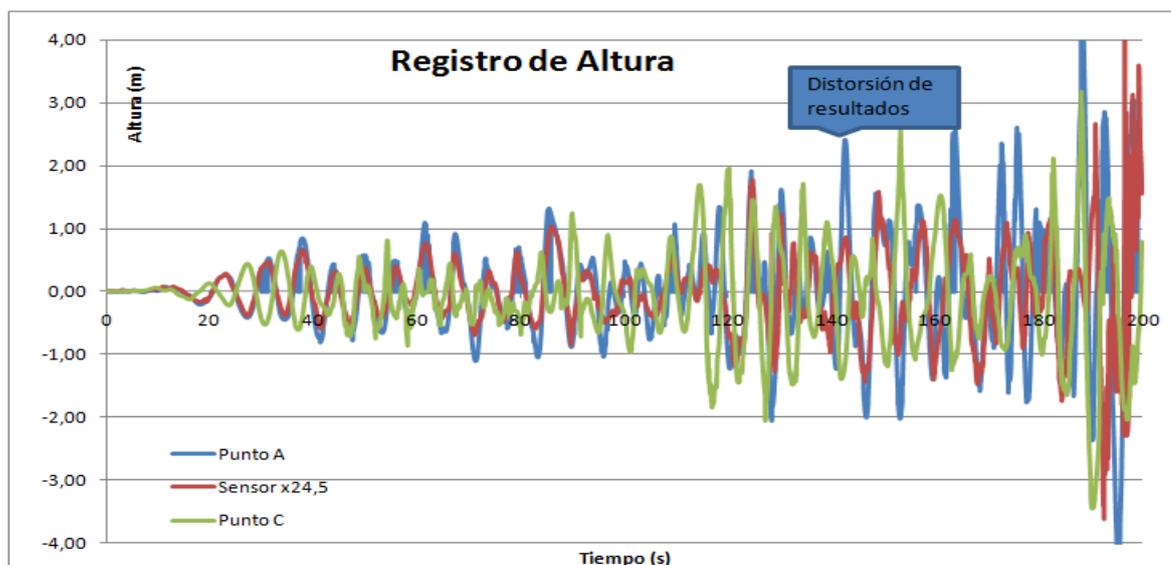
##### 4.2.1.- Ensayos propuestos inicialmente

Como propuesta inicial se pidió analizar los siete casos especificados:

Hs (m)	Tp (s)	h (m)	L (m)	Amplitud de piscina (m)
6.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m
6.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m
4.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m
4.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m
4.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m
2.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m
2.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m

Tabla. 4.2.1.1 Ajuste de mallado en la geometría

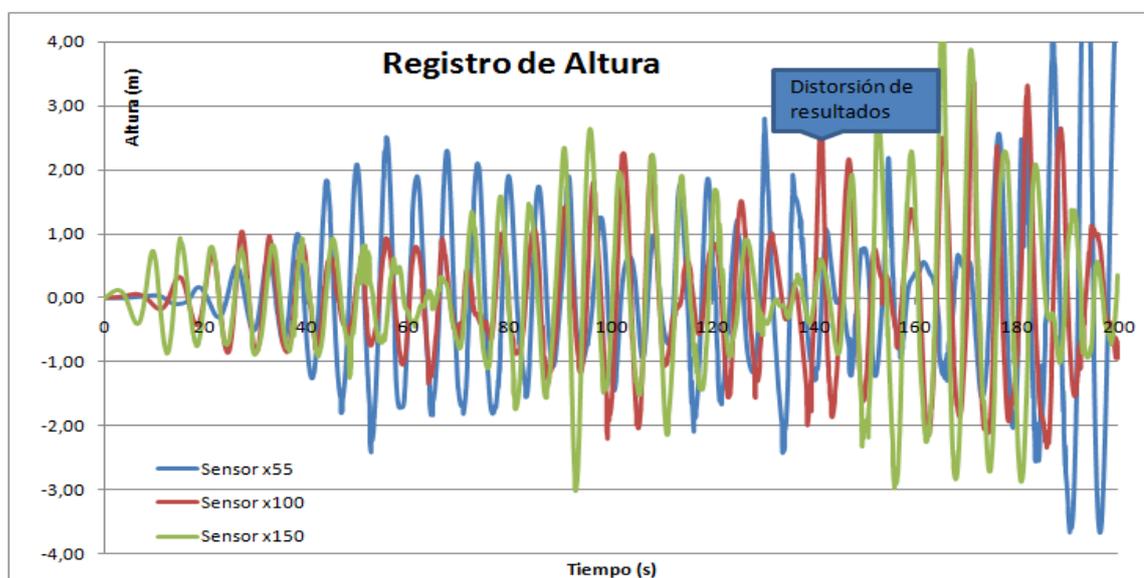
- Caso H2T6 - Altura de ola dos metros con periodo  $T = 6$  segundos



**Fig. 4.2.1.1** Registros de superficie libre

En la figura 4.2.1.1 se observan los registros obtenidos en el punto A, situado a un metro de la pared de fondo y en dos puntos cercanos al dique, uno en el trasdós del mismo y otro en el punto C situado a 17 metros del dique (coordenada  $x = 45$ ).

En las figuras que se presentan se puede apreciar una clara distorsión de resultados a partir de los 120 segundos de simulación aproximadamente, eso se debe a la reflexión de las olas en el propio pistón generador de oleaje y que provoca que los datos obtenidos pierdan fiabilidad a partir de un cierto instante que se ha estimado entre  $t = 120$ s y  $t = 140$ s.



**Fig. 4.2.1.2** Registros de superficie libre

En la figura 4.2.1.2 se tienen los registros en los 3 sensores situados a lo largo del canal virtual de propagación de oleaje. El sensor x55 registra claramente el oleaje reflejado en el dique

En la mayor parte de los resultados obtenidos con la geometría del canal inicial puede apreciarse la misma distorsión.

- Caso H2T8 - Altura de ola dos metros con periodo  $T = 8$  segundos

La altura de agua en el interior de la piscina es ligeramente superior al caso anterior aunque los resultados también se ven distorsionados a partir de un cierto instante.

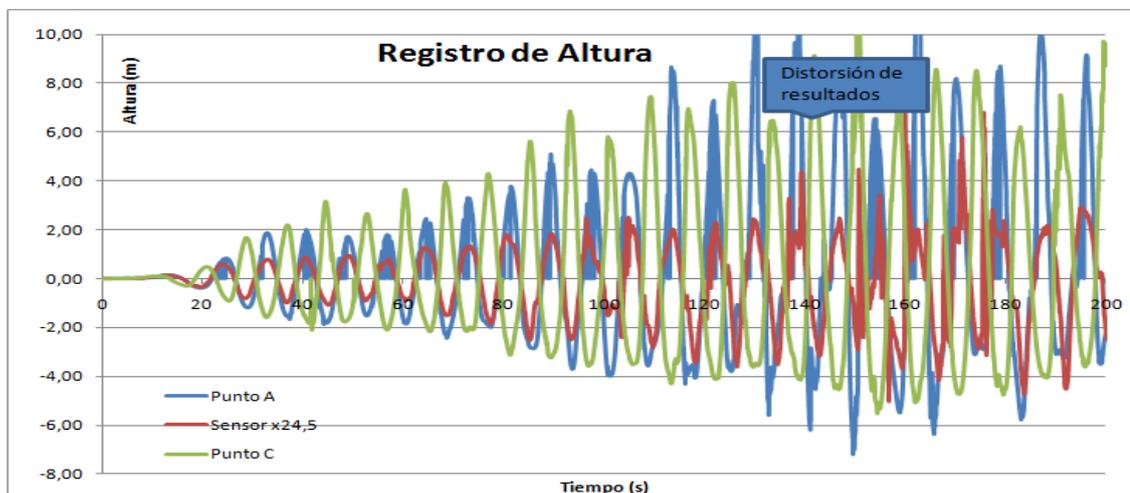


Fig. 4.2.1.3 Registros de superficie libre

Los resultados obtenidos en los sensores intermedios son análogos al caso anterior y no aportan información de interés.

- Caso H4T6 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 6$  segundos

Al aumentar la altura de ola generada se observa que inicialmente esta se ajusta bien variando su posición entre la cota +2 y -2. A partir de  $T \sim 60$ s la superficie libre en el interior de la piscina a sufrir turbulencias obteniendo incluso un registro de cota superior a los 5 metros de altura.

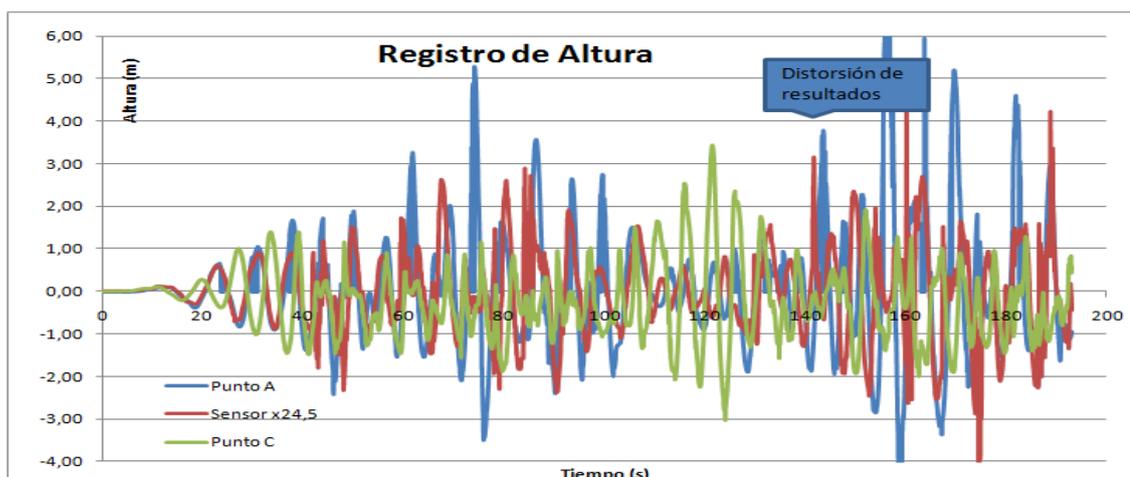


Fig. 4.2.1.4 Registros de superficie libre

El registro a lo largo del resto del canal solo muestra el efecto de superposición del oleaje reflejado.

- Caso H4T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

Los valores de altura de ola máximos obtenidos en el punto cercano a la pared de fondo son muy superiores a los del oleaje propagado por el canal con lo que el dique no logra reducir las oscilaciones en el interior de la piscina.

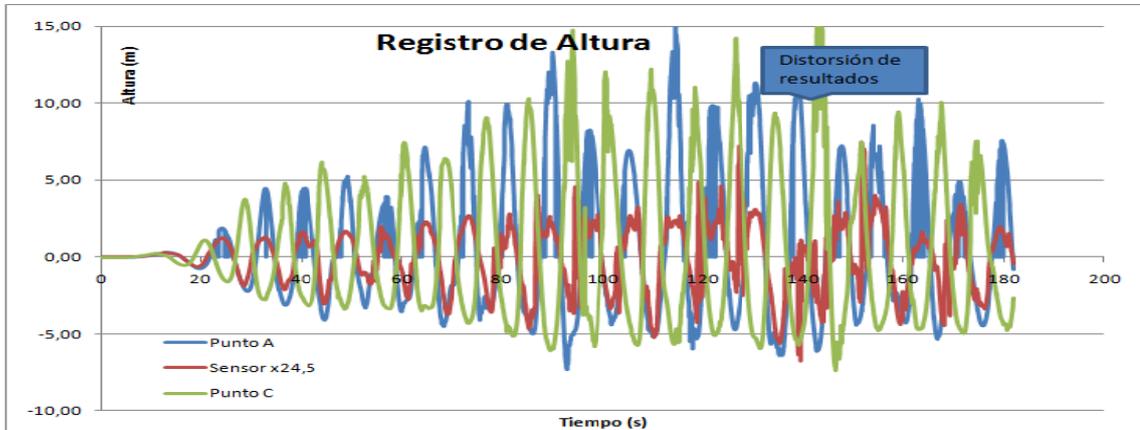


Fig. 4.2.1.5 Registros de superficie libre

El sensor x55 situado a 27 metros del dique muestra unos picos realmente altos en ciertos instantes de la simulación, mayores de lo podría esperarse al superponer ambas olas lo cual podría explicarse como un registro aislado o teniendo en cuenta que la ola ya ha sido reflejada también en el pistón.

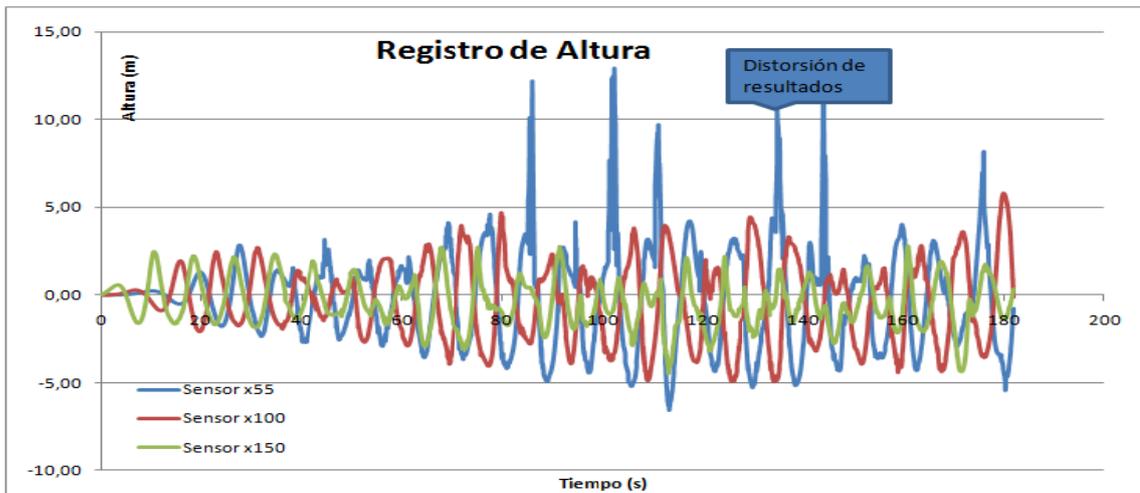


Fig. 4.2.1.6 Registros de superficie libre

- Caso H4T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

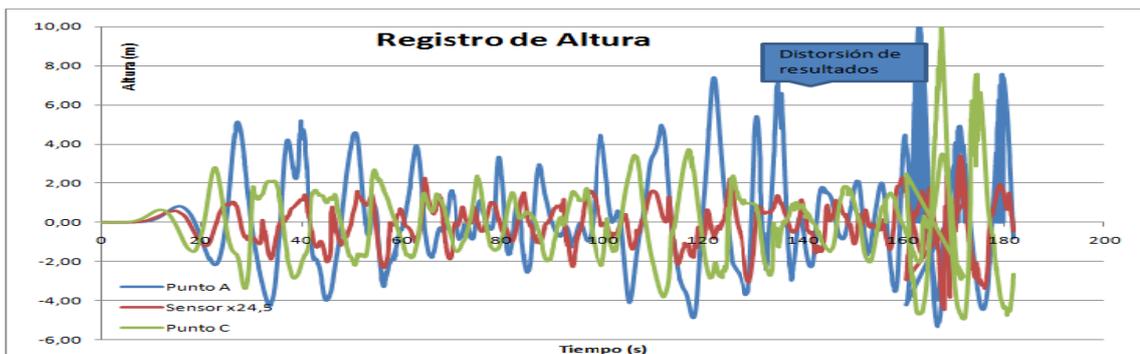


Fig. 4.2.1.7 Registros de superficie libre

- Caso H6T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

Las fluctuaciones de la cota de la superficie libre en este caso empiezan muy pronto, en el instante  $t \sim 30$ s aparece un registro en pared superior a los 10 metros.

Por otra parte se decide reducir el tiempo de simulación a 120 segundos dada la distorsión en los resultados que se producía a partir de ese momento.

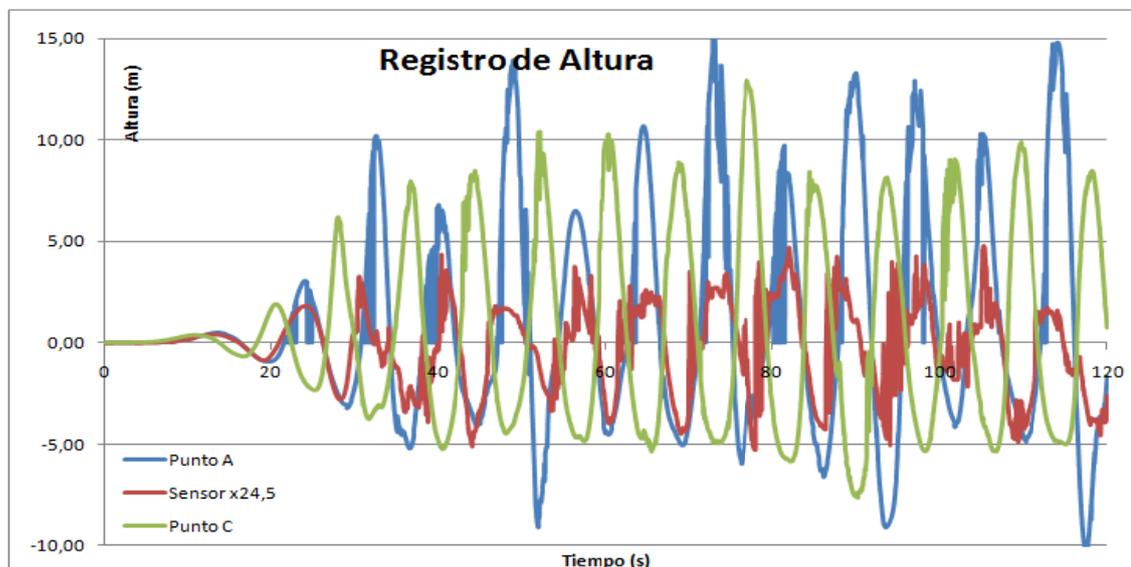


Fig. 4.2.1.8 Registros de superficie libre

- Caso H6T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

En este caso la altura de agua cerca de la pared no llega a superar los 10 metros excepto un instante de la simulación.

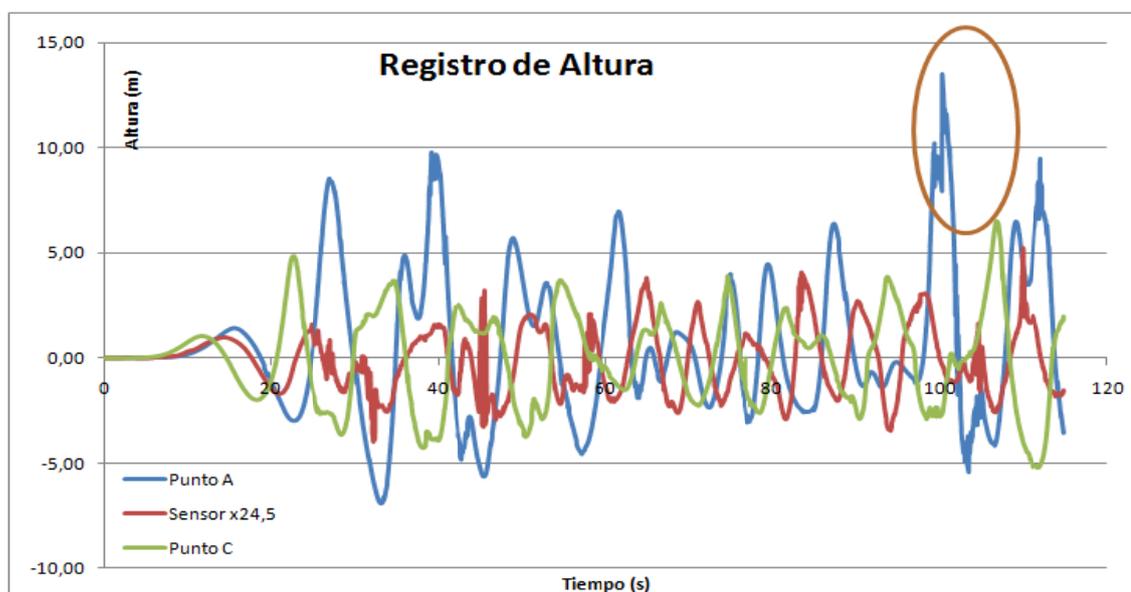


Fig. 4.2.1.9 Registros de superficie libre

En los sensores situados a lo largo del canal, el oleaje incidente parece ajustarse bien a los 6 metros hasta el momento en que la ola reflejada en el dique se superpone con la incidente, efecto que puede observarse muy pronto en los sensores x55, x100 y x150 dada la longitud de piscina insuficiente.

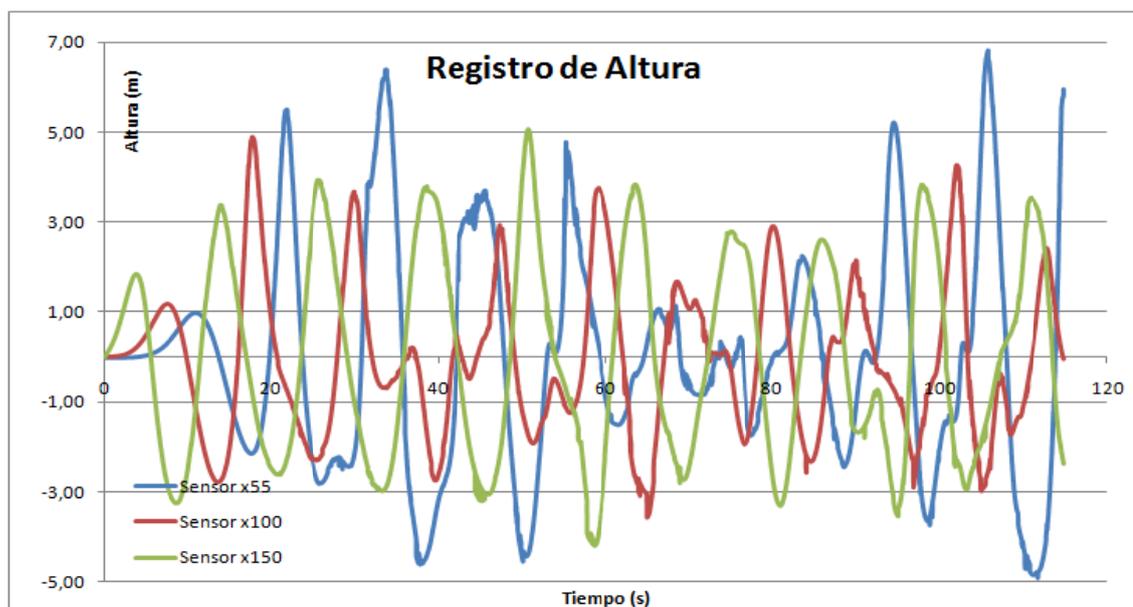


Fig. 4.2.1.10 Registros de superficie libre

#### 4.2.2.- Ensayos con longitud de piscina modificada

Al aumentar la distancia entre dique y pistón conseguimos reducir el efecto del oleaje reflejado.

Las nuevas características del canal y oleaje producido viene dado por la tabla siguiente:

Hs (m)	Tp (s)	h (m)	L (m)	Amplitud de piscina (m)	Longitud del canal (m)	Velocidad de Impulso del Pistón (m/s)
6.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m	532 m	1.90
6.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m	311.5 m	1.66
4.00 m	12.00 s	20.00 m	152 m	38 m	532 m	1.27
4.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m	311.5 m	1.11
4.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m	192.5 m	0.92
2.00 m	8.00 s	20.00 m	89 m	22 m	311.5 m	0.55
2.00 m	6.00 s	20.00 m	55 m	14 m	192.5 m	0.46

Tabla. 4.2.2.1 Características del canal virtual

Los siguientes gráficos muestran la variación obtenida al aumentar la longitud del canal en cada uno de los ensayos:

- Caso H2T6 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 6$  segundos

Se aprecia poca variación en los resultados o esas no son significantes.

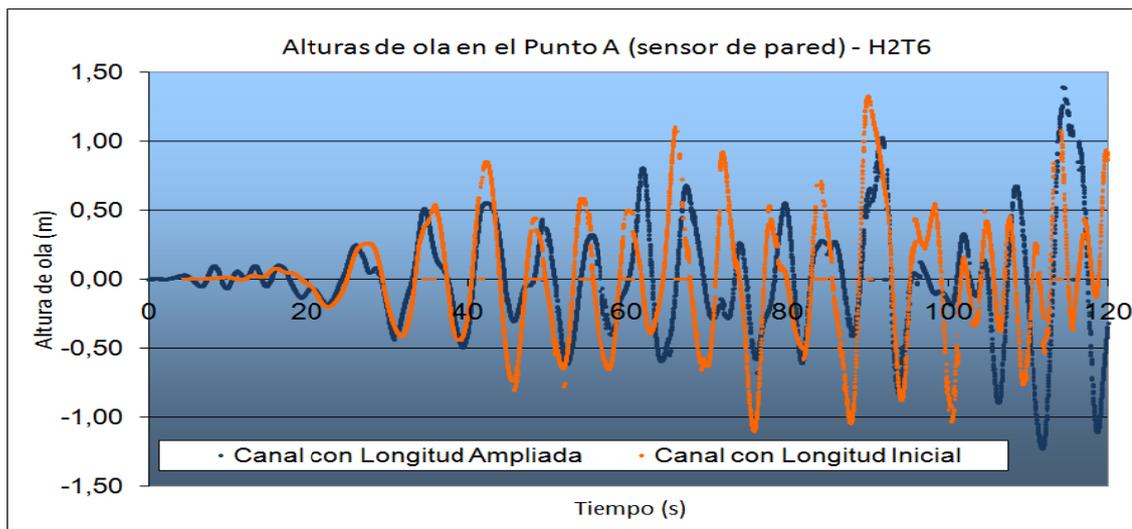


Fig. 4.2.2.1 Comparación de superficie libre

- Caso H2T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

Se observa una clara reducción de la oscilación del agua en el interior de la piscina. efecto que se acentúa con el tiempo. La altura máxima en este caso solo alcanza los 3 metros en la zona cercana a la pared. Efecto que también se observa en la figura 4.2.2.3 correspondiente a los sensores distribuidos a lo largo del canal.

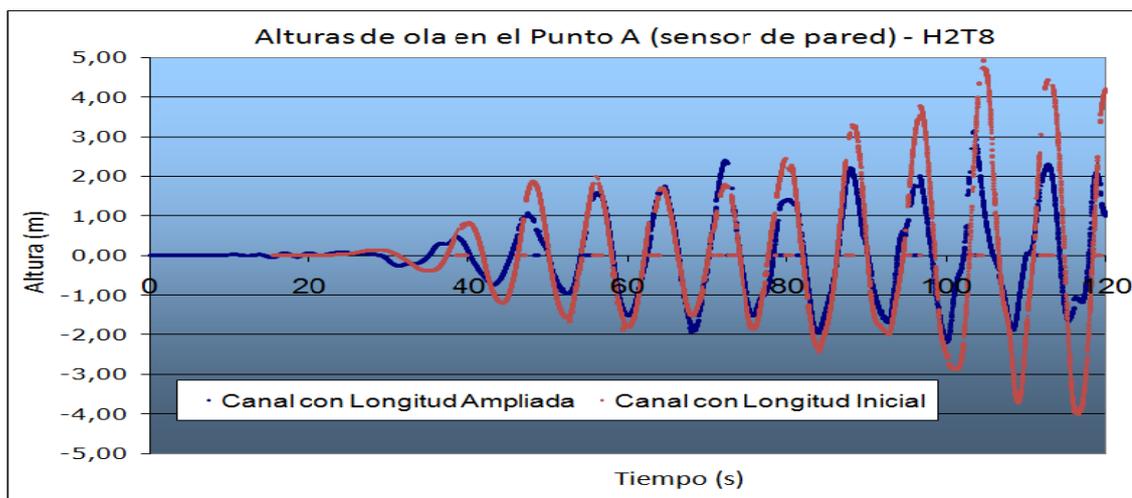


Fig. 4.2.2.2 Comparación de superficie libre

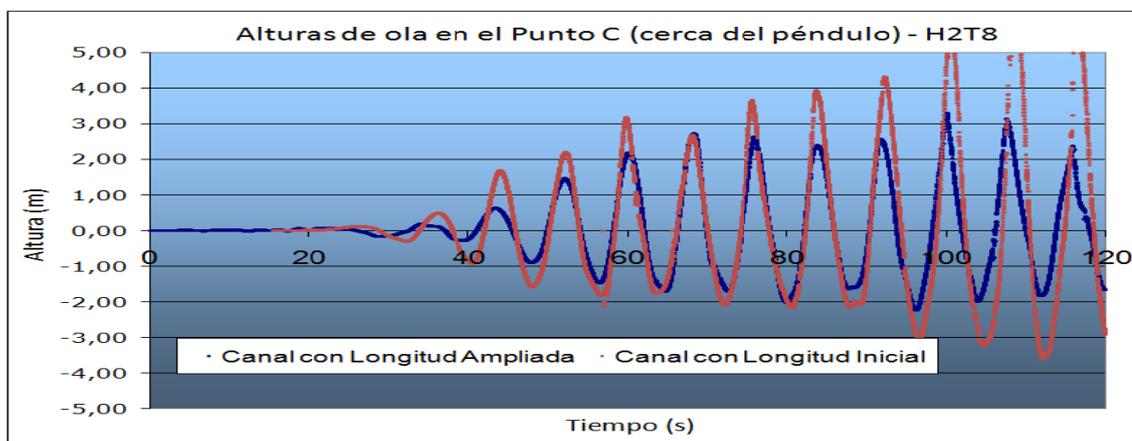


Fig. 4.2.2.3 Comparación de superficie libre

- Caso H4T6 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 6$  segundos

En este caso el comportamiento de la lámina libre de agua es similar aunque los picos se produzcan en instantes distintos.

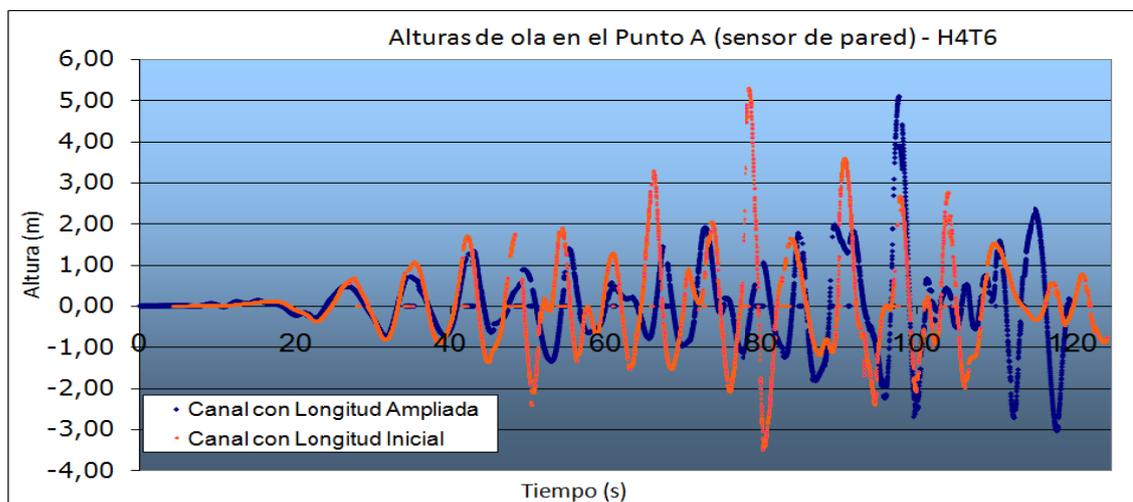


Fig. 4.2.2.4 Comparación de superficie libre

- Caso H4T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

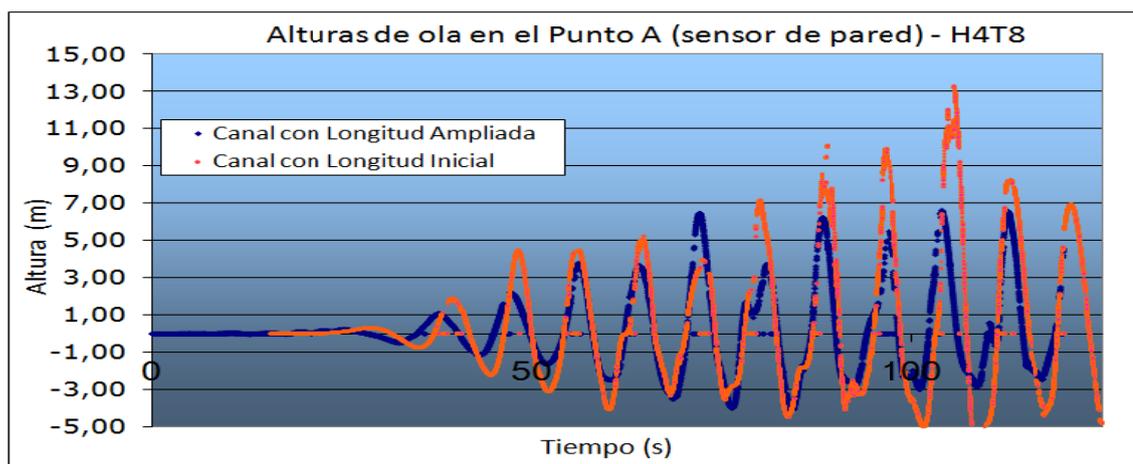


Fig. 4.2.2.5 Comparación de superficie libre

- Caso H4T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

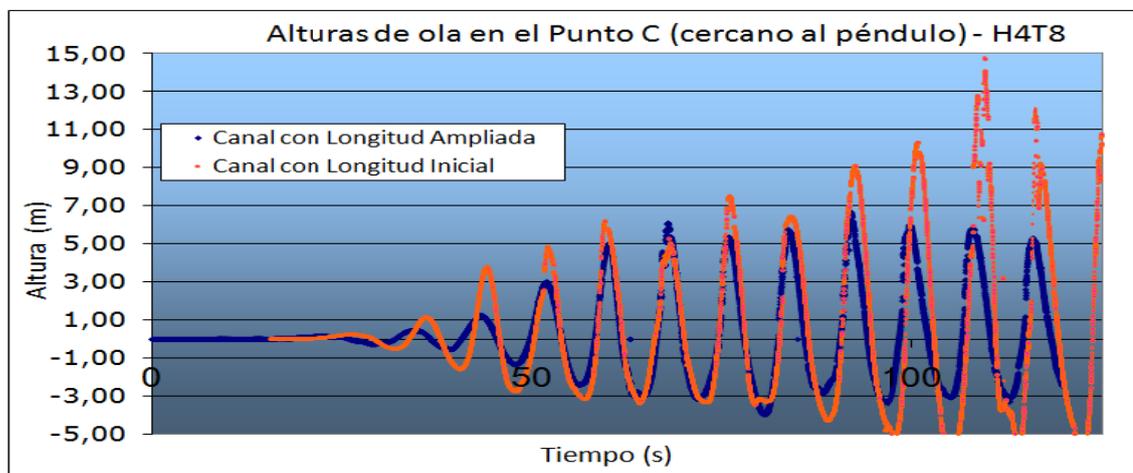


Fig. 4.2.2.6 Comparación de superficie libre

- Caso H4T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

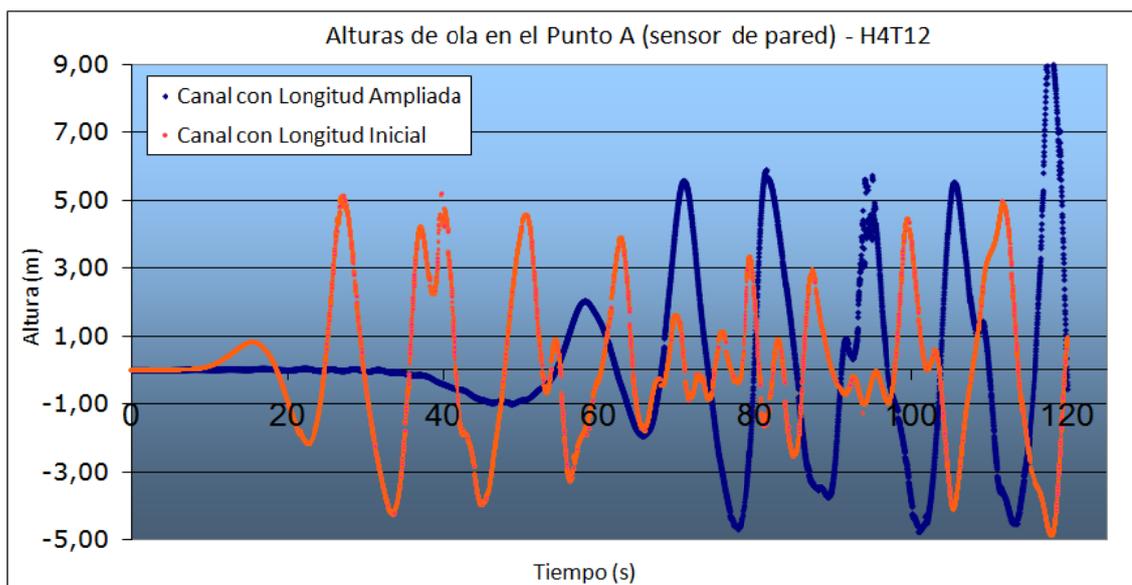


Fig. 4.2.2.7 Comparación de superficie libre

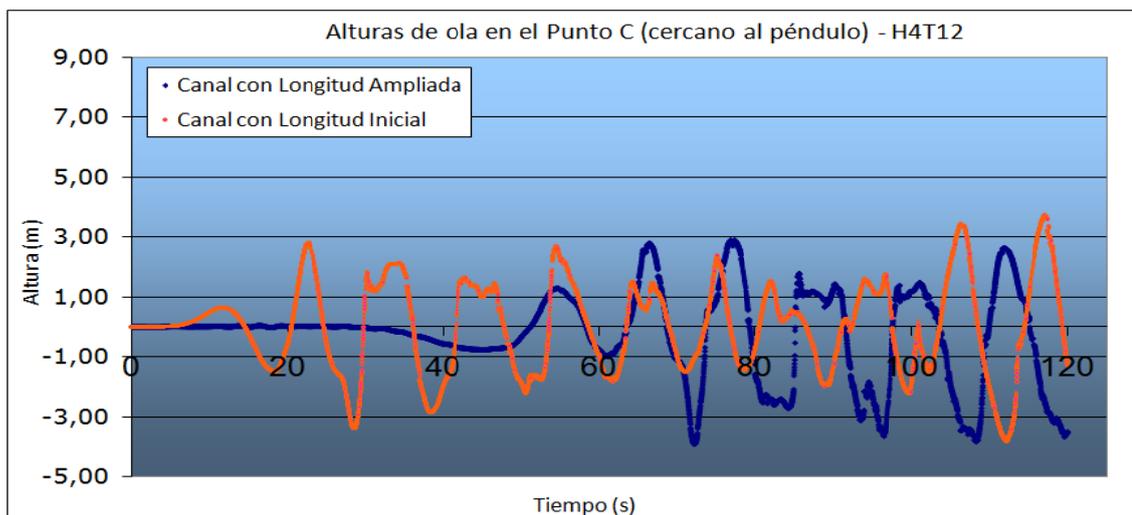


Fig. 4.2.2.8 Comparación de superficie libre

- Caso H6T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

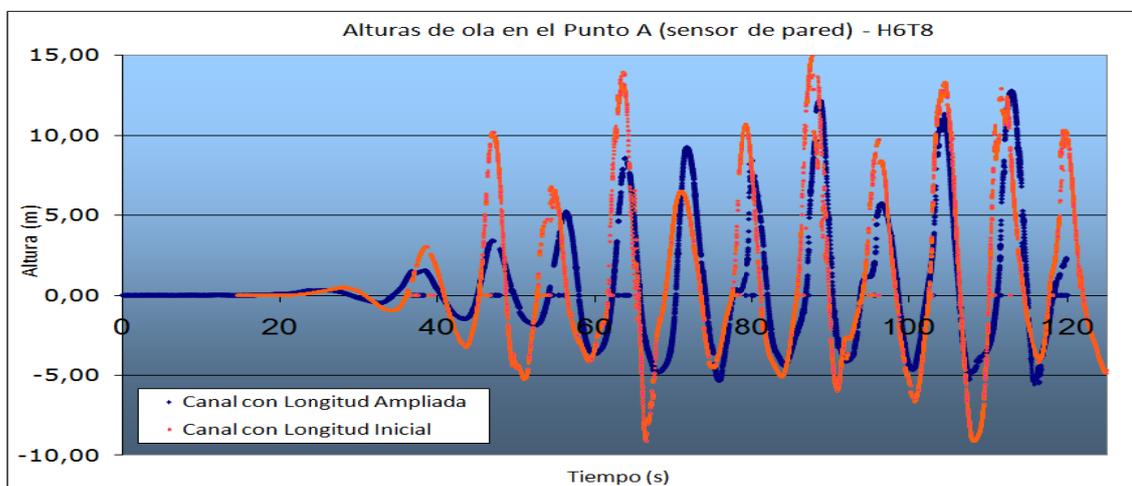


Fig. 4.2.2.9 Comparación de superficie libre

En este caso se ha realizado un desfase temporal para facilitar la comparación a nivel visual de ambos resultados y podemos observar que en la figura 4.2.2.10 coinciden.

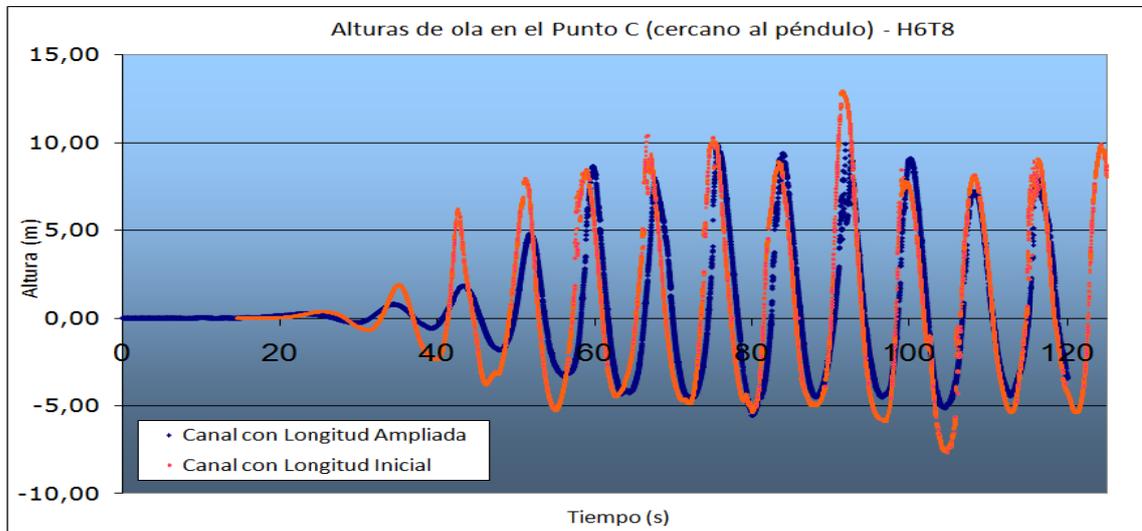


Fig. 4.2.2.10 Comparación de superficie libre

- Caso H6T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

Al disponer de un canal de mayor longitud, el oleaje no llega a reflejarse en el pistón disponiendo así de mayor tiempo de simulación sin distorsiones aunque el oleaje también tarde más en llegar hasta el dique.

Aun así las oscilaciones en el interior de la piscina son muy grandes con lo que aparece la necesidad de modificar los parámetros o realizar modificaciones capaces de aportar una mejora importante al comportamiento de la lamina libre de agua en el trasdós del dique.

Por otra parte, y de acuerdo con la figura 4.2.2.12 vemos que la condiciones de funcionamiento del pistón quedan validadas dado que el oleaje generado coincide en todos los casos con lo que se pretende obtener.

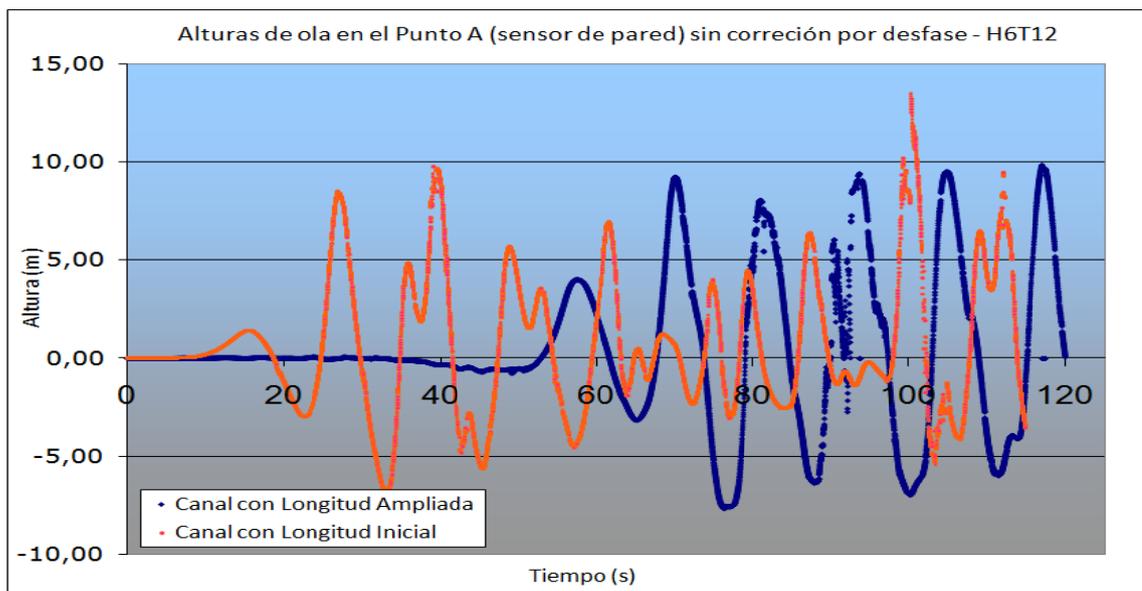


Fig. 4.2.2.11 Comparación de superficie libre

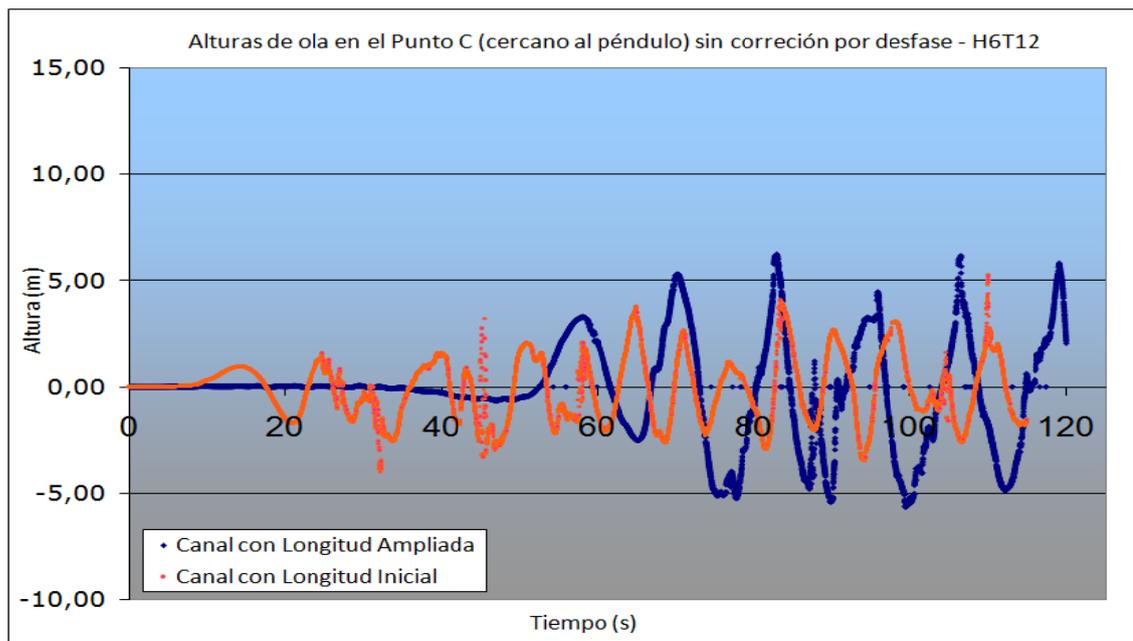


Fig. 4.2.2.12 Comparación de superficie libre

- Caso H6T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos con movimiento del dique impedido.

El hecho de inmovilizar el péndulo nos permite calcular los esfuerzos máximos que el oleaje produce sobre el dique. Se ha tomado como caso de estudio el de mayor altura de ola con periodo de 12 segundos.

Si se compara el registra obtenido en el punto A con el caso anterior, se puede observar claramente que las alturas y las oscilaciones en el trasdós de la piscina son mucho menores.

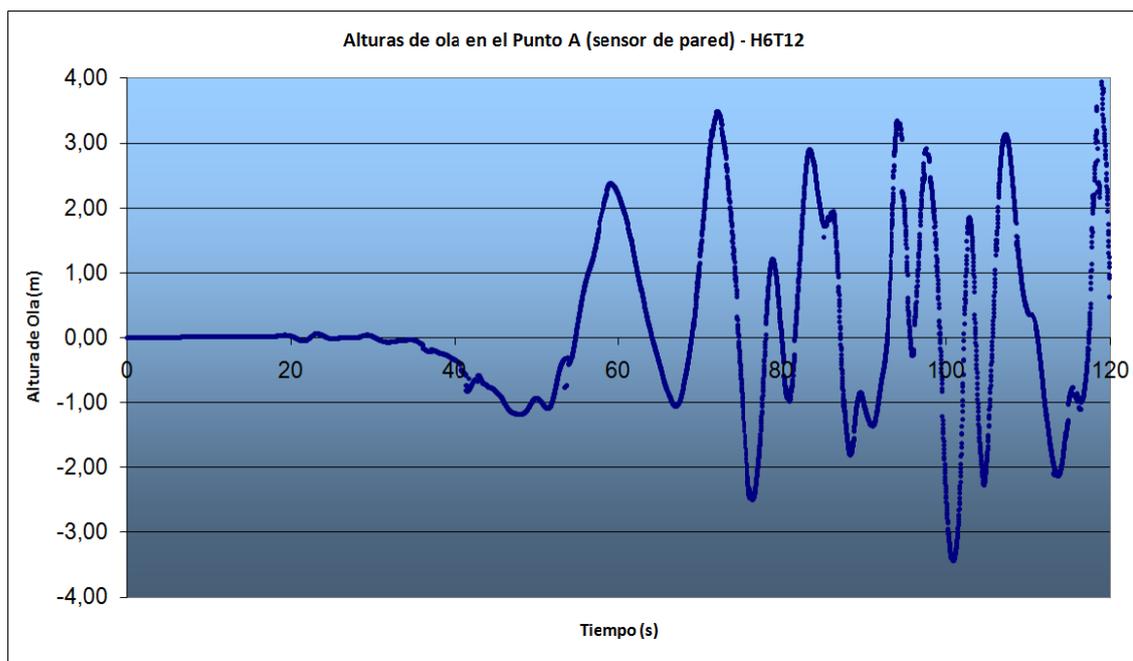


Fig. 4.2.2.13 Comparación de superficie libre

#### 4.2.3.- Comparación de registros en el punto A con y sin dique.

Con estos cuatro ensayos se pretende ver en qué grado afecta la existencia del dique a la cota de agua alcanzada en la zona cercana a la pared. Se comprueba que a la repercusión de instalar tal estructura es mayor cuanto mayor es la intensidad del oleaje tal y como muestran las siguientes figuras:

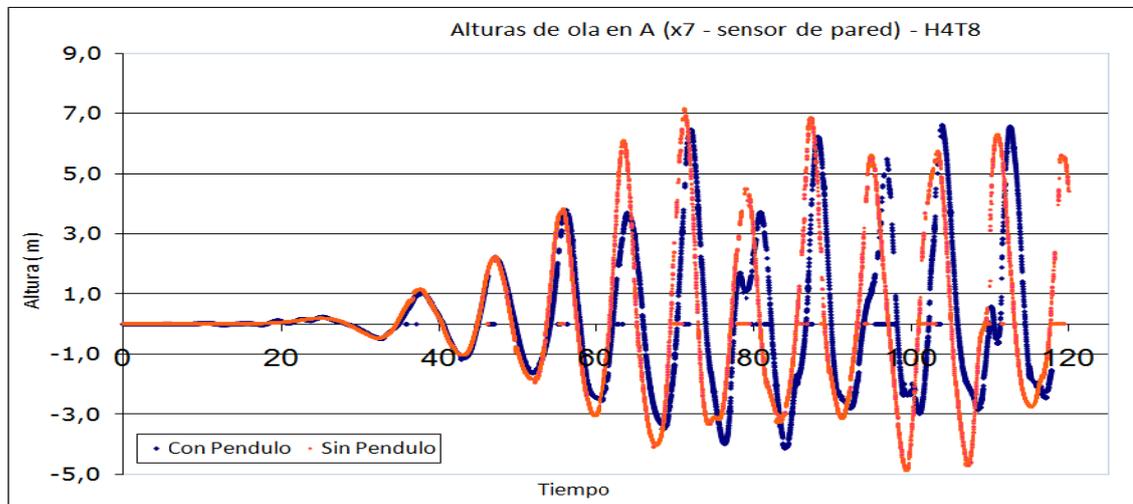


Fig. 4.2.3.1 Comparación de superficie libre

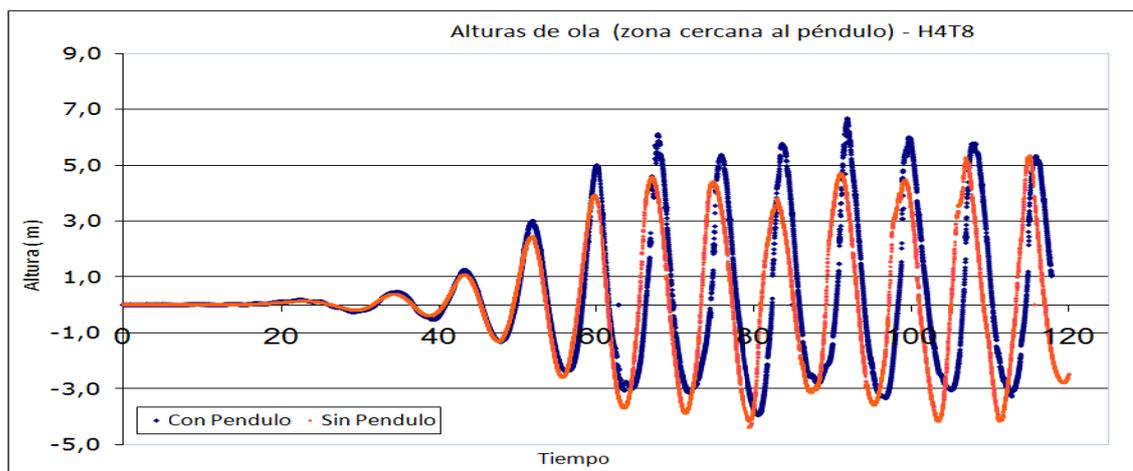


Fig. 4.2.3.2 Comparación de superficie libre

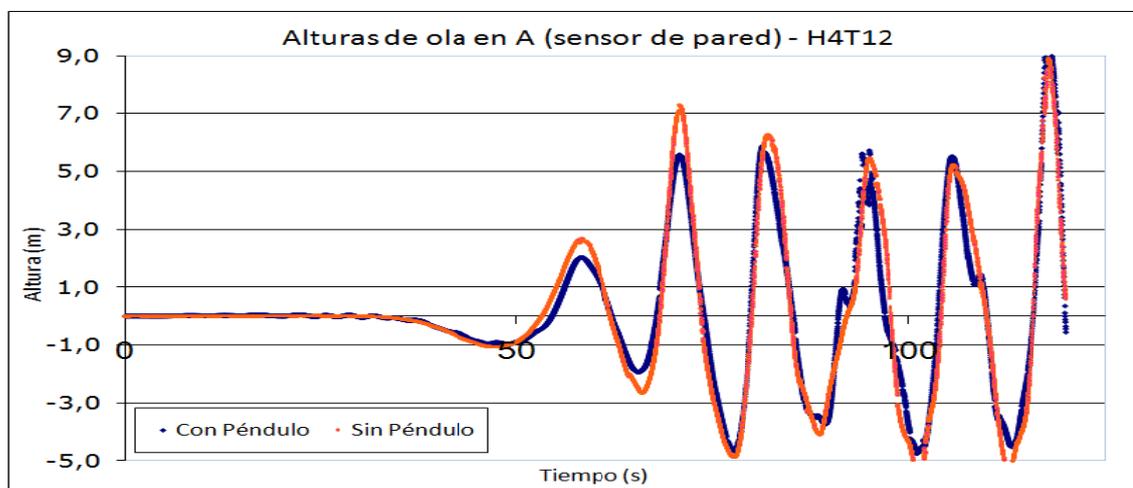


Fig. 4.2.3.3 Comparación de superficie libre

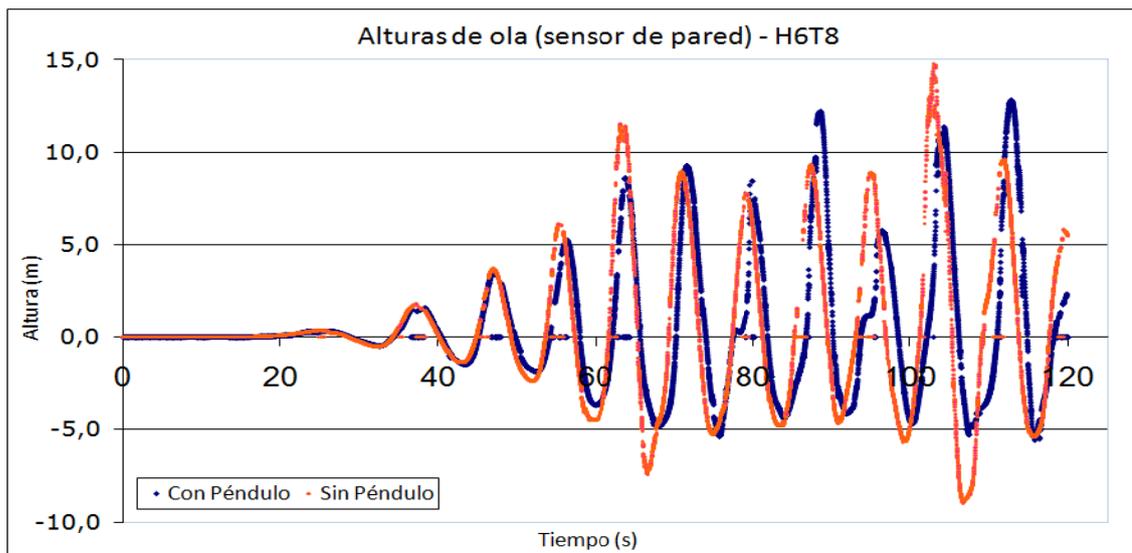


Fig. 4.2.3.4 Comparación de superficie libre

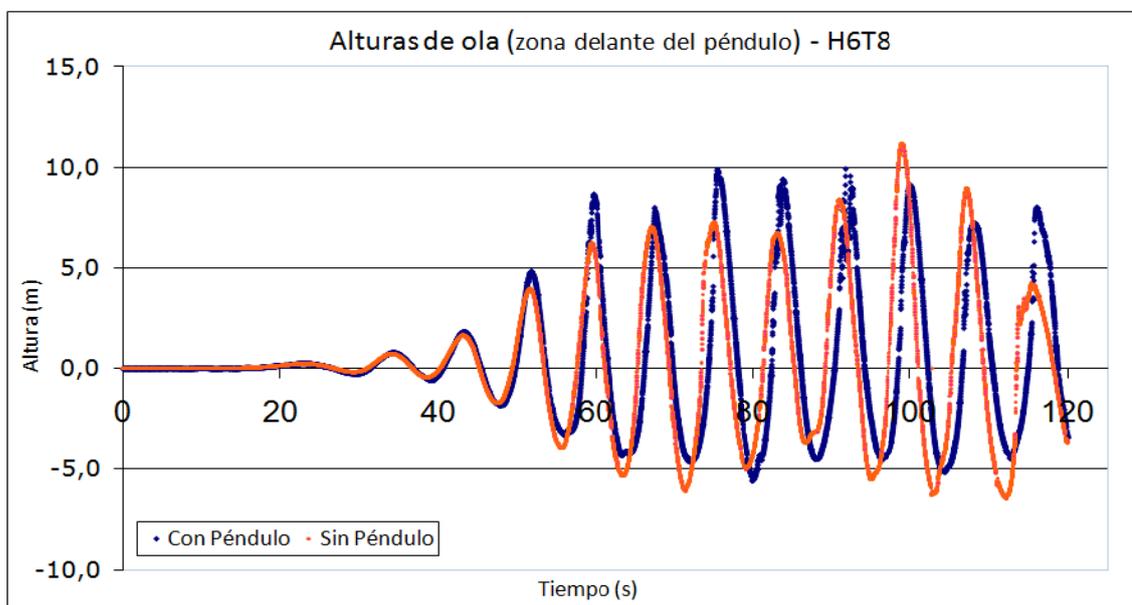


Fig. 4.2.3.5 Comparación de superficie libre

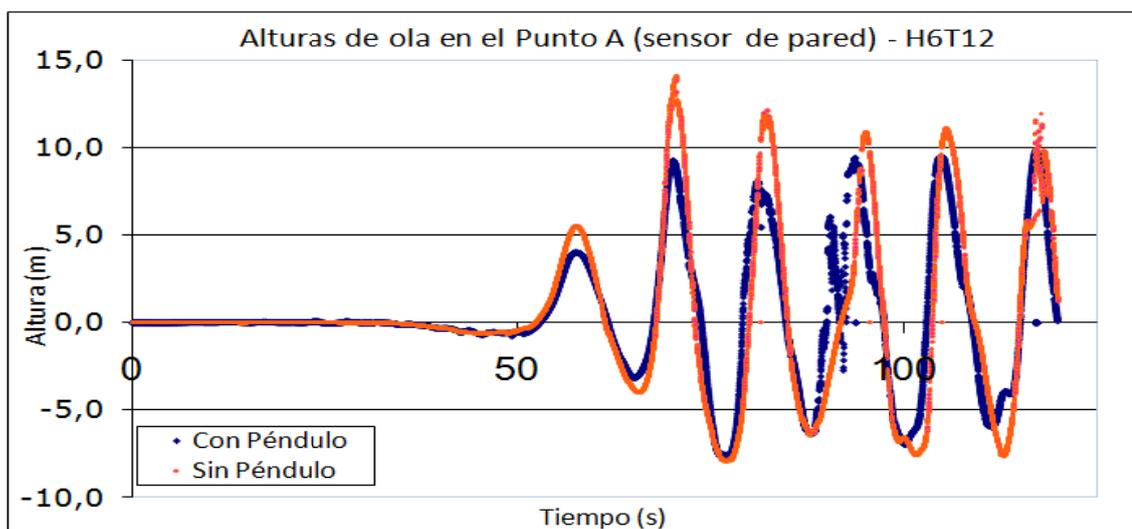


Fig. 4.2.3.6 Comparación de superficie libre

#### 4.2.4.- Comparación de registros en el punto A y C en el caso de fuerza aplicada

Dados los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, se plantea la idea de impedir parcialmente el movimiento del péndulo mediante la aplicación de una varias fuerzas puntuales aplicadas sobre la esfera inferior del mismo y que simularían la acción de unos pistones hidráulicos.

Para ello se decide realizar tres ensayos:

- Un ensayo inicial con una fuerza constante de 178KN equivalente al 50% de la fuerza máxima necesaria para impedir totalmente el movimiento del dique hacia el interior. Esta fuerza solo se aplica cuando el dique se mueve en el eje x con una velocidad negativa, es decir, se desplaza hacia el interior de la piscina.
- Un segundo ensayo con la misma fuerza al que en el caso anterior pero que actúa cuando el producto del desplazamiento por la velocidad es mayor que cero, es decir, en ambos sentidos.
- Un último ensayo aumentando la fuerza hasta los 268KN equivalente al 75% de la fuerza máxima.

A continuación se muestran los resultados obtenidos y su comparación con otros casos de interés.

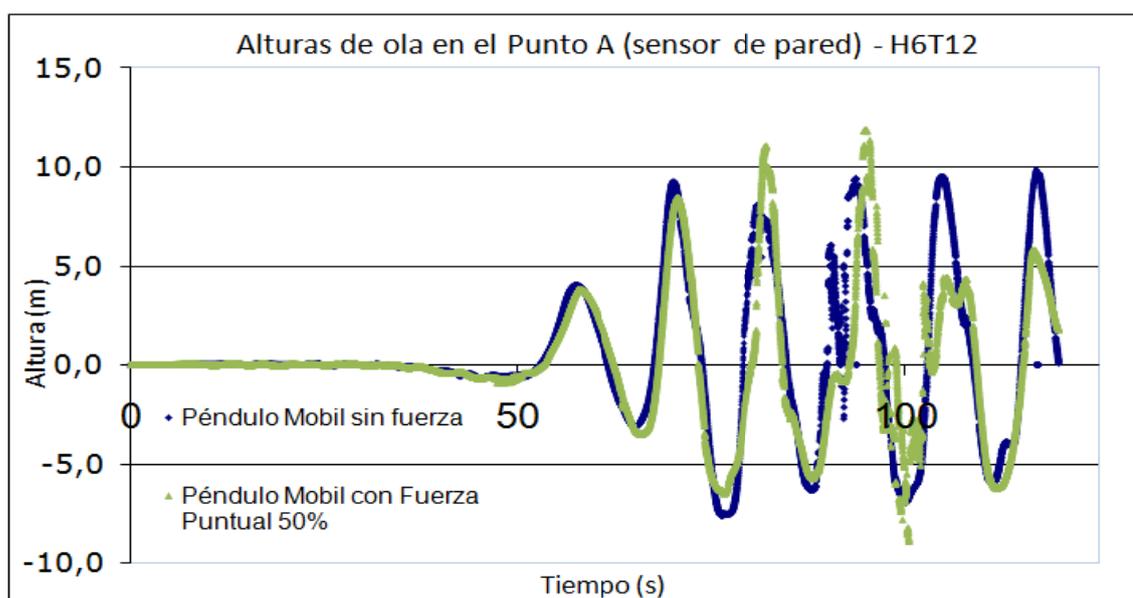


Fig. 4.2.4.1 Comparación de superficie libre con fuerza aplicada

La fuerza aplicada en el primer ensayo no provoca cambios importantes a destacar, por el contrario, parece que aumente la oscilación en el interior de la piscina en vez de mitigarla.

Al aplicar esa misma fuerza en ambos sentidos tampoco parece que los resultados mejoren de forma importante por lo que se decide incrementar la fuerza aplicada hasta el 75%.

En la figura 4.2.4.5 se observa una ligera mejora al aumentar la fuerza, rebajando los picos, al menos inicialmente, aunque finalmente se pierda el control sobre las oscilaciones de la lámina de agua próxima a la pared de fondo.

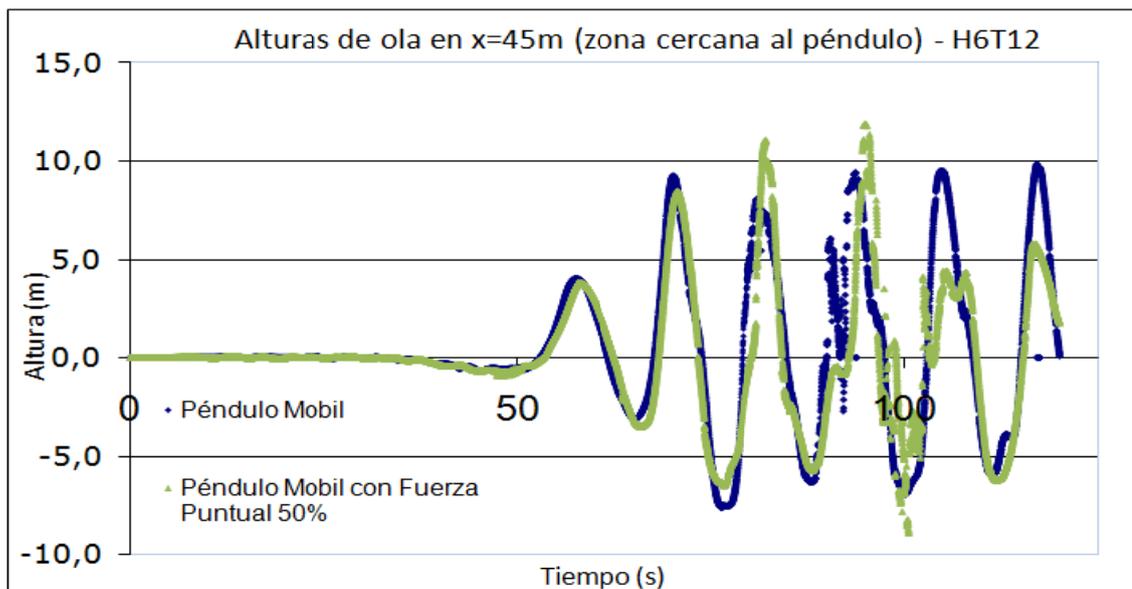


Fig. 4.2.4.2 Comparación de superficie libre

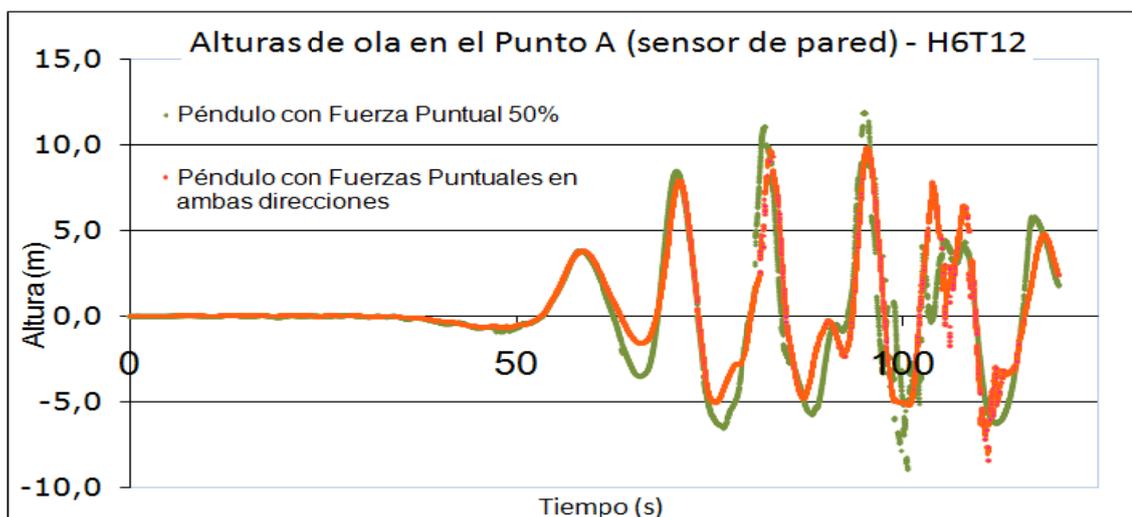


Fig. 4.2.4.3 Comparación de superficie libre con fuerza aplicada

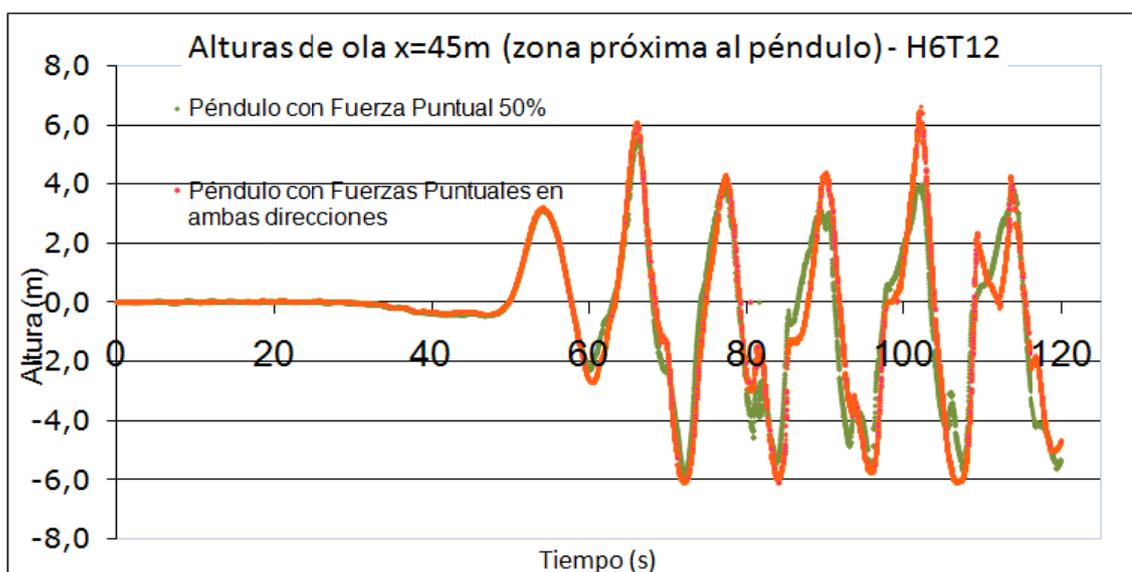


Fig. 4.2.4.4 Comparación de superficie libre con fuerza aplicada

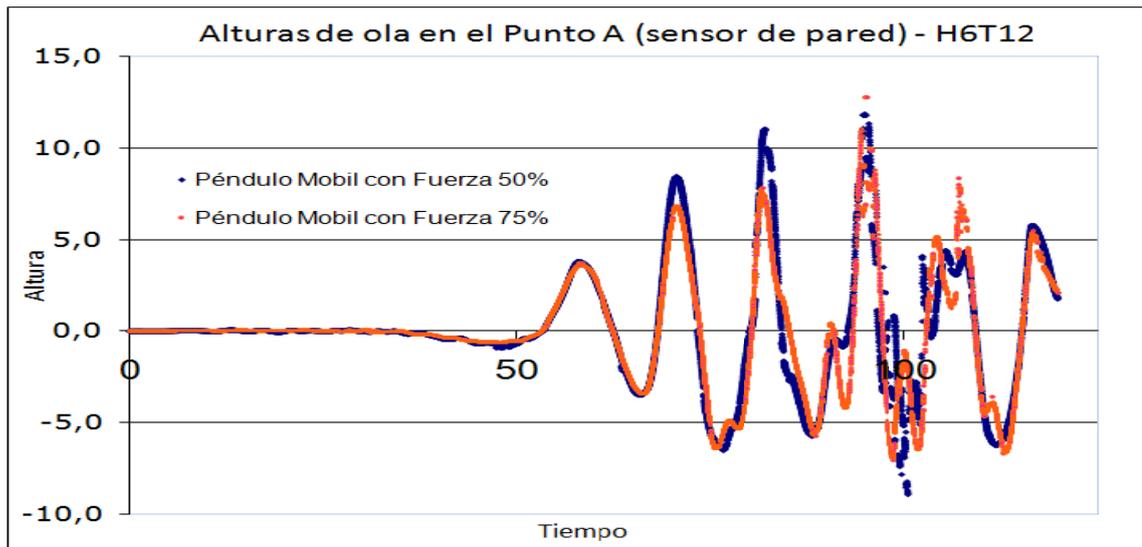


Fig. 4.2.4.5 Comparación de superficie libre con fuerza aplicada

#### 4.2.5.- Comparación de registros en el punto A y C en el caso de existir una zona disipativa.

Dada la escasa mejora en los resultados obtenidos hasta ahora, se propone definir una zona viscosa en el modelo capaz de disipar la energía de las corrientes de agua que aparecen en la parte inferior del péndulo, simulando un conjunto de turbinas de fondo que servirían como mecanismos de extracción de energía.

Para ello se realizan dos ensayos con diferente valor de viscosidad en la zona entre suelo y la base del péndulo, con un ancho de cuatro metros:

- Un primer ensayo con valor de viscosidad '1' que queda descartado de forma casi inmediata por no aportar resultados de interés.
- Un segundo ensayo con viscosidad '3' que muestra una clara mejora en los resultados, reduciendo considerablemente la cota de agua en el punto A cercano a la pared.
- Un tercer ensayo incrementando la viscosidad hasta '5'.

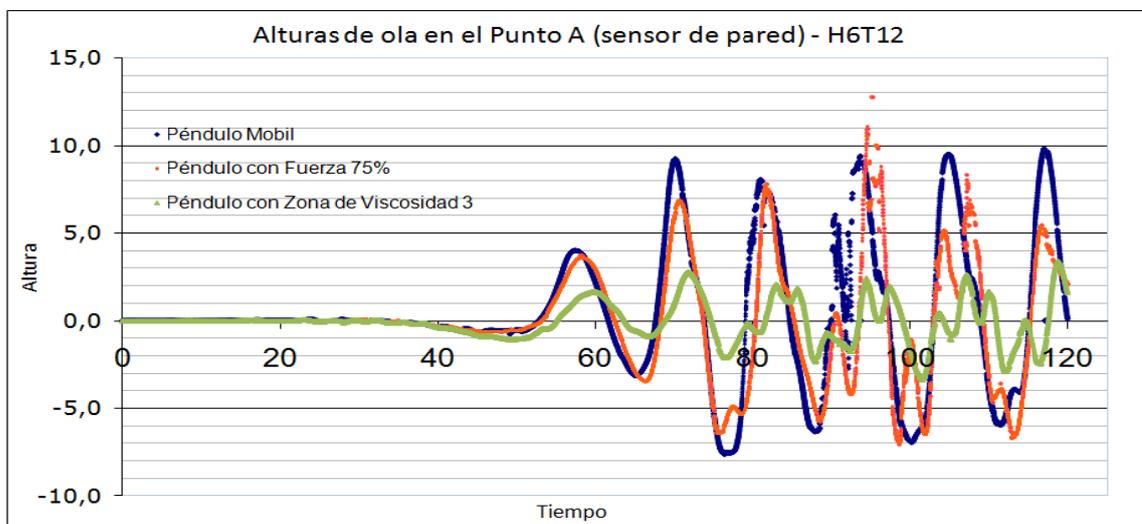


Fig. 4.2.5.1 Comparación de superficie libre con zona disipativa

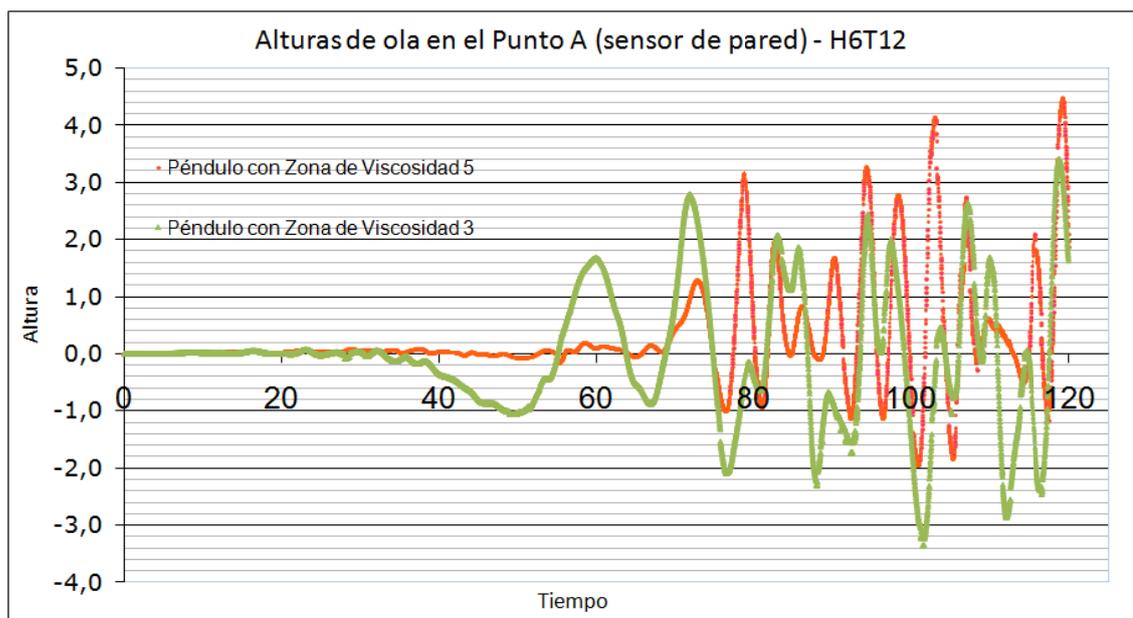


Fig. 4.2.5.2 Comparación de superficie libre con zona disipativa

Para ello se realizan dos ensayos con diferente valor de viscosidad en la zona entre suelo y la base del péndulo, con un ancho de cuatro metros:

Teniendo en cuenta que la viscosidad sigue una escala exponencial y para el agua tiene un valor de '-3' se comprueba que en el último ensayo la viscosidad es excesiva y absorbe casi en su totalidad la energía de las corrientes de agua tal y como se ve en la figura 4.2.2.26.

#### 4.2.6.- Comparación de registros en el punto A en el caso del dique pendular inverso

En este caso se propone cambiar la geometría y las propiedades físicas del dique situando su centro de rotación en el fondo del canal.

Modificando el código del módulo de cálculo de elementos finitos para partículas se introduce la opción de aplicar una fuerza variable en función de la velocidad del péndulo de forma que la fuerza aplicada sobre el péndulo es de la forma,

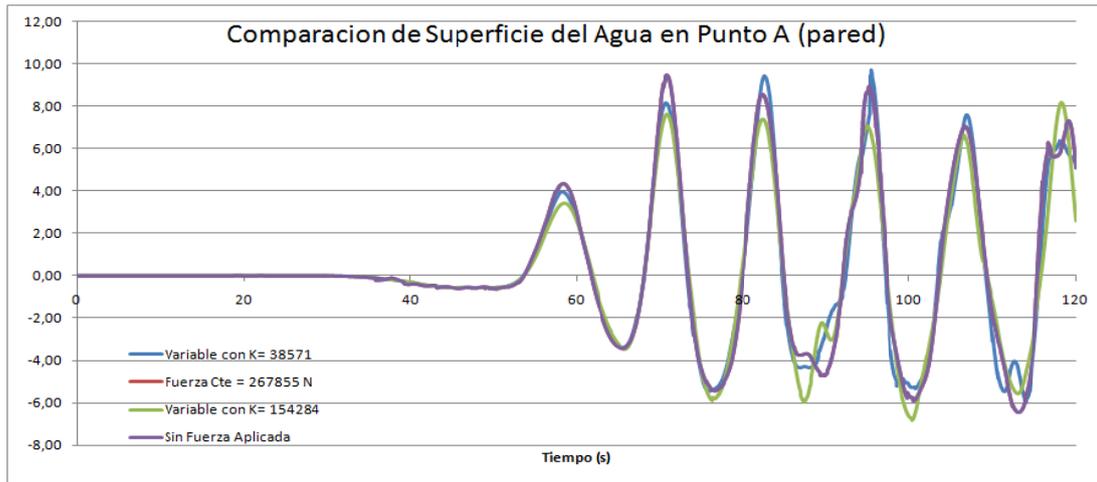
$$F = K + a_0 \cdot K$$

donde  $a_0$  es una constante aplicable en caso que de requiera una fuerza de valor constante y  $K$  es una constante que hay que estimar según el intervalo de fuerzas que deseemos aplicar sobre el conjunto.

Inicialmente se simulan cuatro casos:

- Ensayo con fuerza constante  $a_0 = 267855N$
- Ensayo sin fuerza aplicada
- Ensayo con  $K = 38571$  estimada a partir de las velocidades obtenidas en el ensayo sin fuerza aplicada
- Ensayo con  $K = 154284$

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.2.6.1 siguiente,

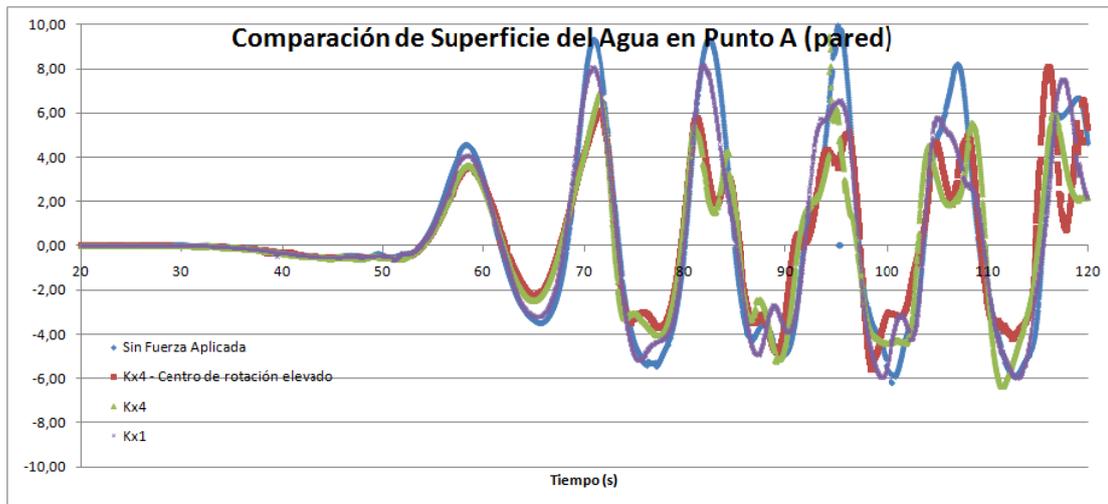


**Fig. 4.2.6.1** Comparación de superficie libre con fuerza proporcional a la velocidad

No se observan variaciones significativas entre los cuatro ensayos lo que hace suponer algún tipo de error en la implementación del nuevo código.

Efectivamente existía un error en la definición del punto de referencia de aplicación de la fuerza y este se sobrescribía en cada paso de tiempo, así que se procede a corregir el error y comparar resultados.

Nuevamente se realizan los ensayos obteniendo el siguiente registro de alturas:



**Fig. 4.2.6.1** Comparación de superficie libre con fuerza proporcional a la velocidad

Puede comprobarse que los resultados más óptimos se producen al disponer una fuerza variable con  $K = 154284 \text{ N.s/m}$  (Kx4) y al desplazar el centro de rotación del dique hasta la cota y = -13 metros.

Por otra parte, aparecen una serie de oscilaciones de la superficie como consecuencia del rebase del oleaje por encima del dique a partir aproximadamente del instante  $t = 115$  segundos.

Se observa una clara variación con los obtenidos anteriormente lo que confirma la correcta ejecución del nuevo módulo cálculo.

### 4.3.- Resultados referentes a los esfuerzos y oscilaciones del CG del péndulo

#### 4.3.1.- Ensayos con longitud de piscina inicial

En las siguientes gráficos se tiene la posición de la coordenada x del centro de gravedad del dique en cada paso de tiempo.

Conocer como se mueve el dique con el tiempo es de gran interés para estimar las características que debe de tener la estructura de apoyo para soportar tales movimientos en un dique de las dimensiones consideradas.

- Caso H2T6 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 6$  segundos

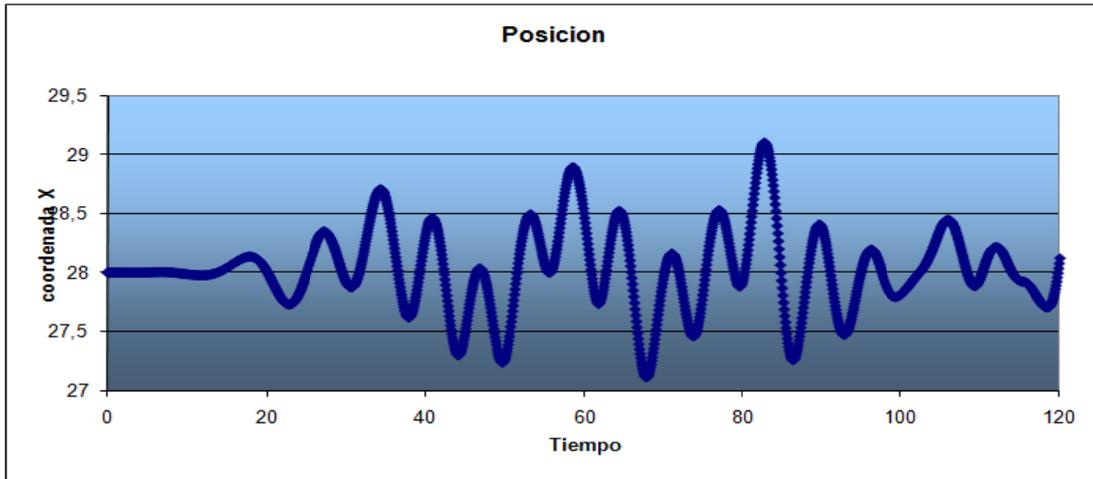


Fig. 4.3.1.1 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H2T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

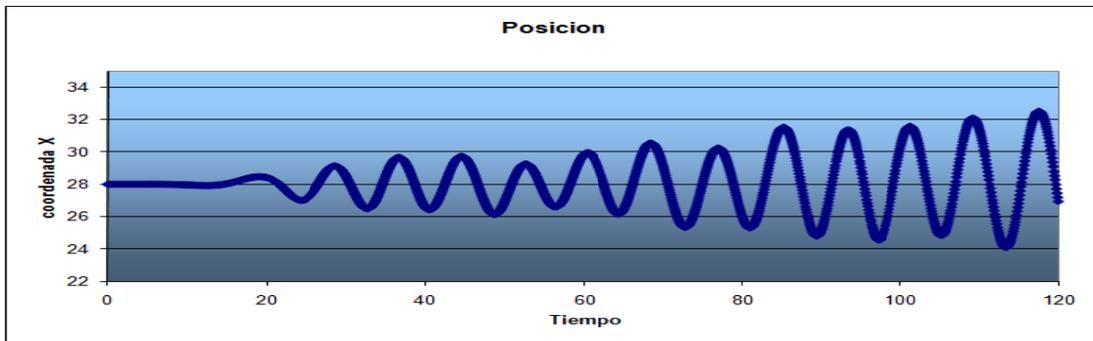


Fig. 4.3.1.2 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H4T6 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 6$  segundos

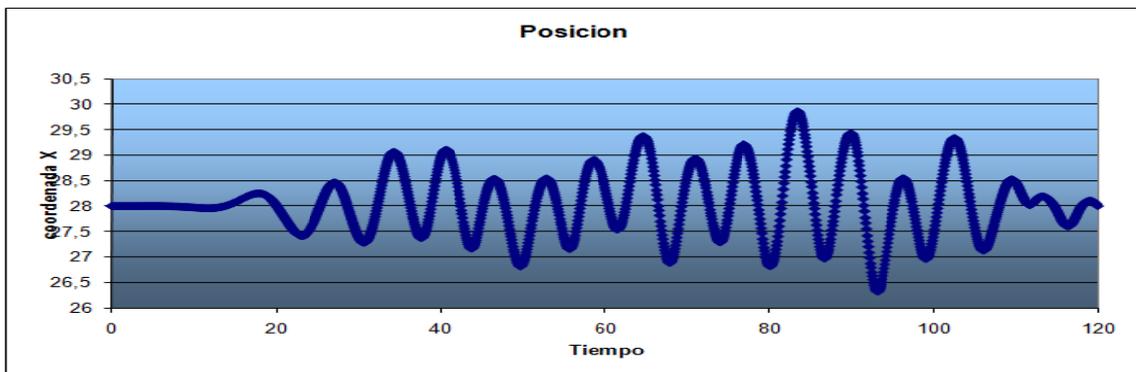


Fig. 4.3.1.3 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H4T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

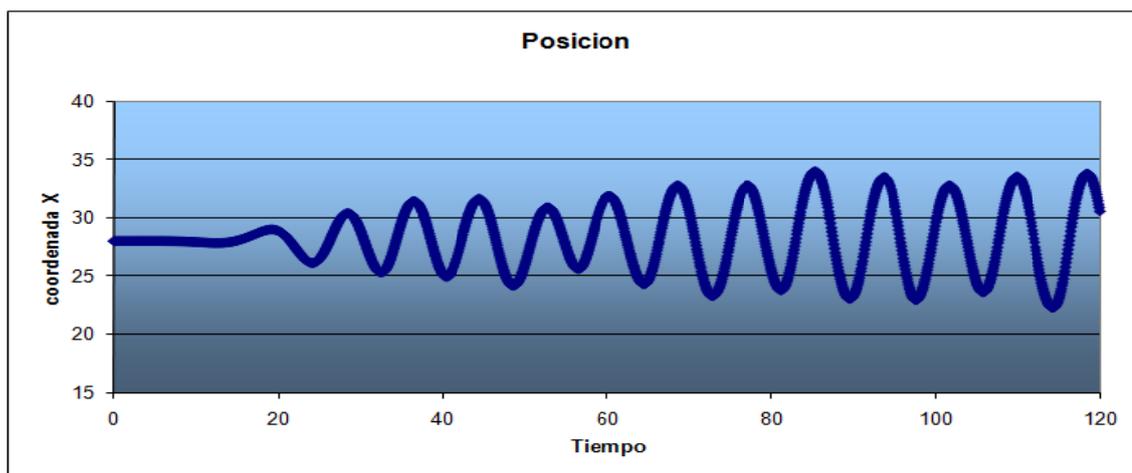


Fig. 4.3.1.4 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H4T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

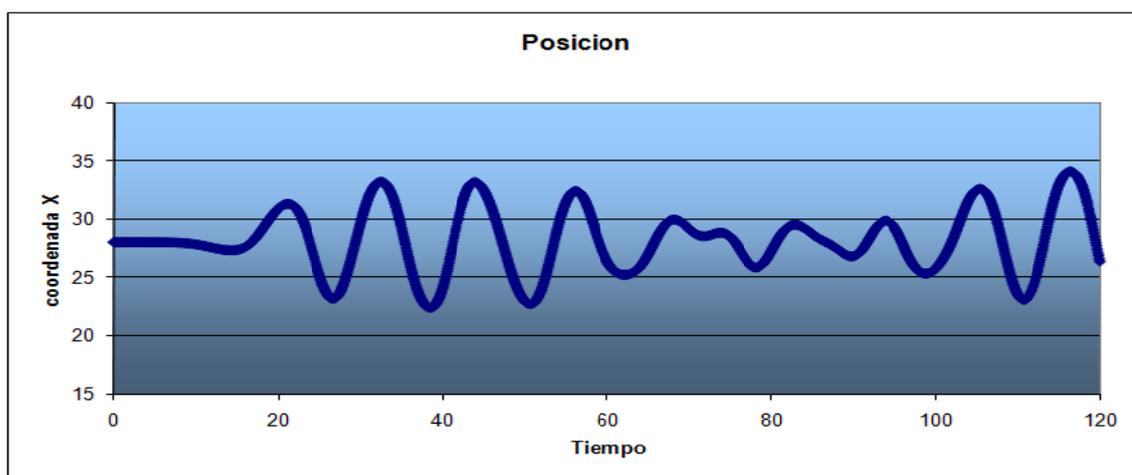


Fig. 4.3.1.5 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H6T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

En los dos ensayos con altura de ola de seis metros, las oscilaciones a las que se ve sometido el dique son significantes, llegando a desplazarse el CG en algunos casos hasta 7 sobre la coordenada x.

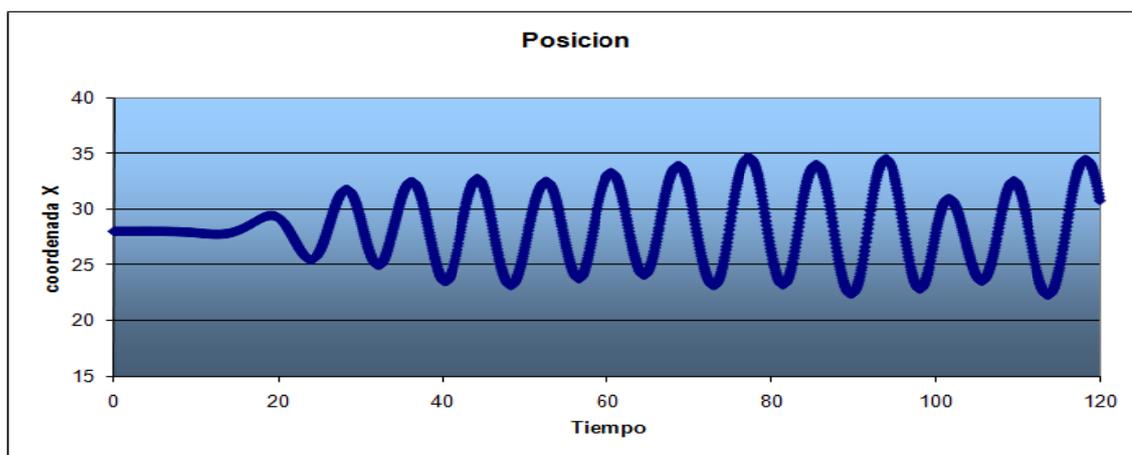


Fig. 4.3.1.6 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H6T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

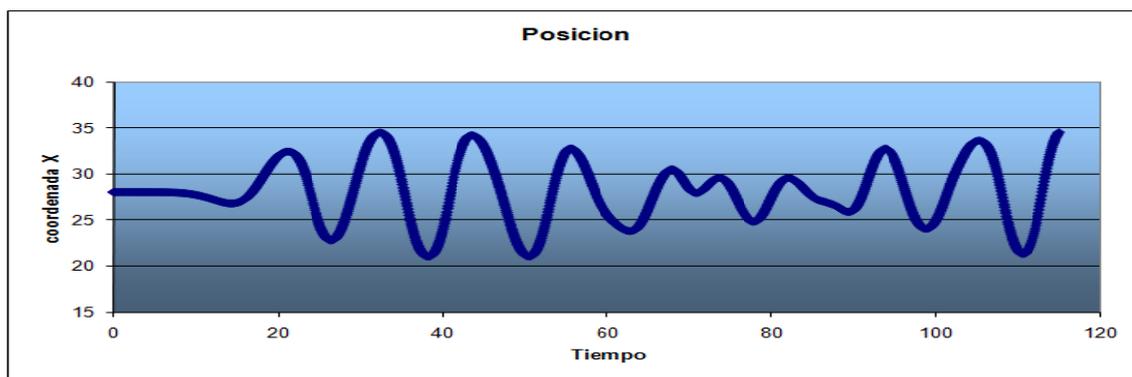


Fig. 4.3.1.7 Posición CG del péndulo - Eje X

Se observa también que el desplazamiento es mayor en dirección al canal de simulación, es decir, cuando las corrientes de agua bajo el péndulo son hacia el exterior de la piscina.

En capítulos posteriores se puede observar que la velocidad de la corriente de agua es superior cuando se dirige al exterior de la piscina.

#### 4.3.2.- Ensayos con longitud de piscina modificada

Al variar la longitud del canal y aumentar la profundidad del mismo se observan ligeras variaciones en el movimiento del péndulo aunque no son significantes.

- Caso H2T6 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 6$  segundos

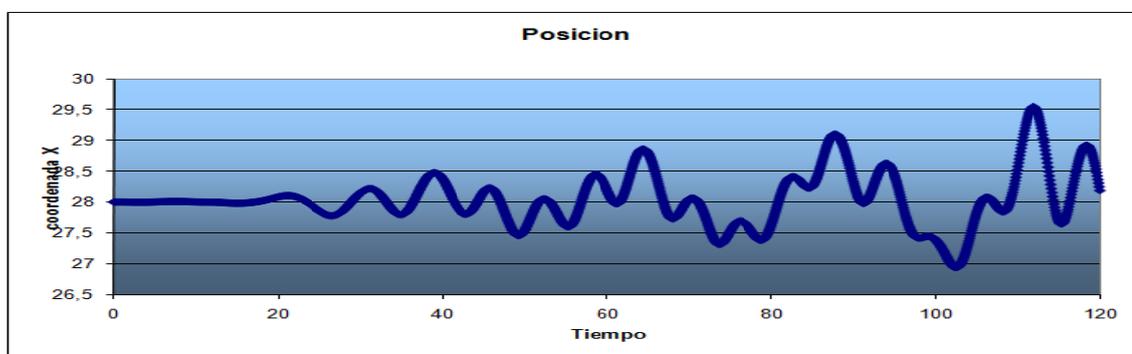


Fig. 4.3.2.1 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H2T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

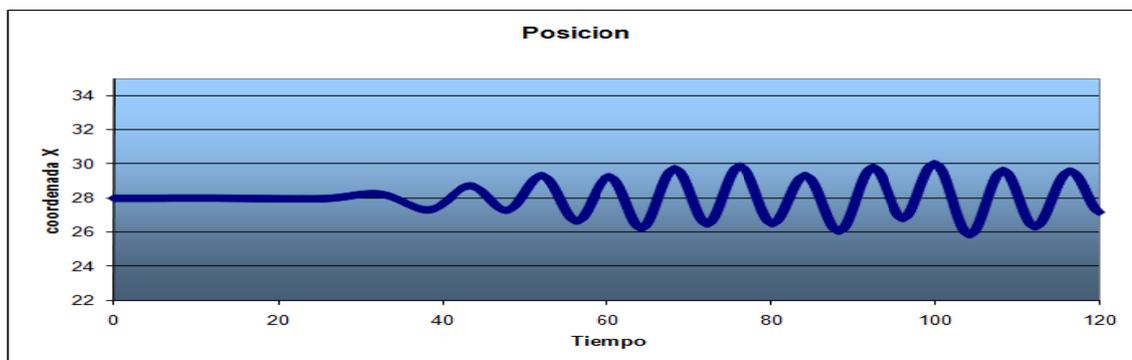


Fig. 4.3.2.2 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H4T6 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 6$  segundos

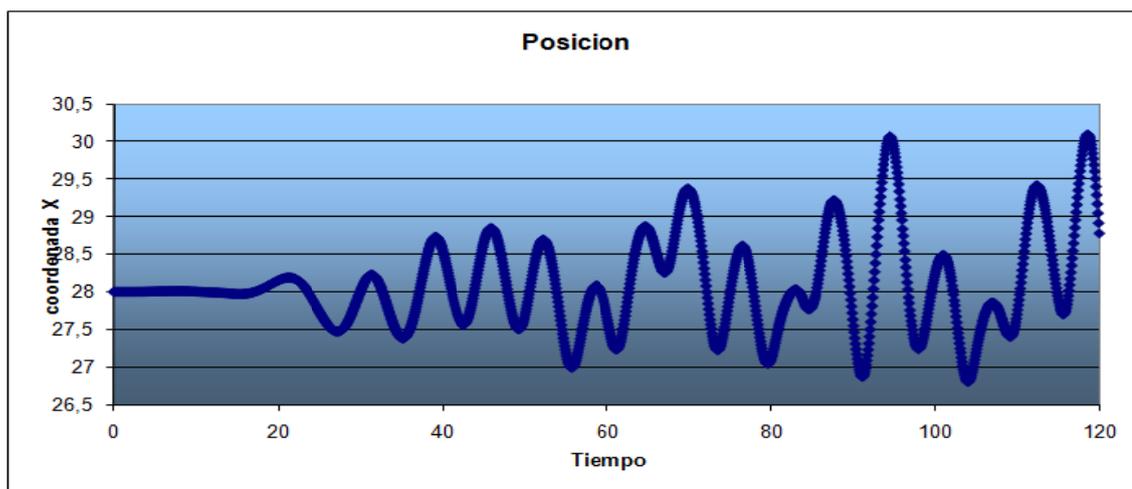


Fig. 4.3.2.3 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H4T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

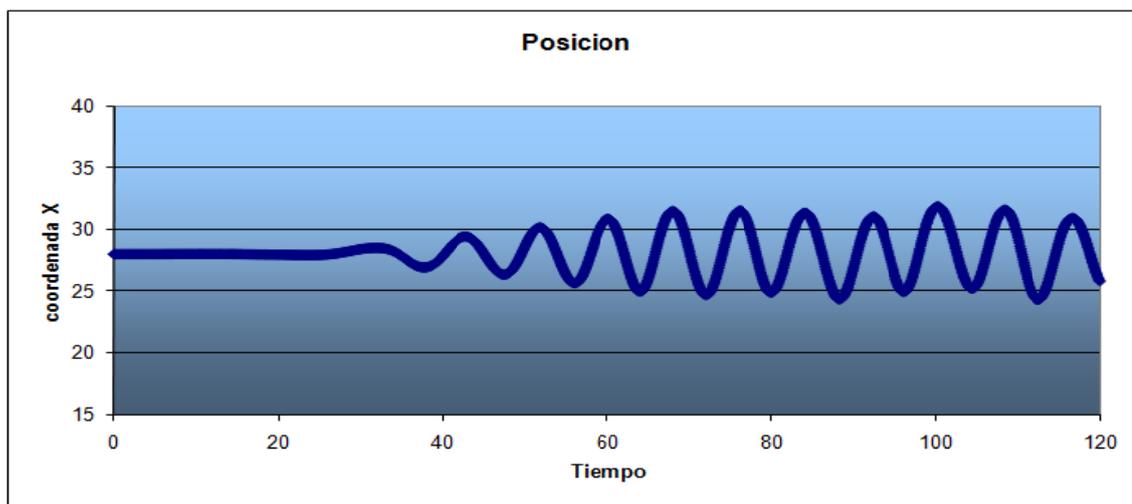


Fig. 4.3.2.4 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H4T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

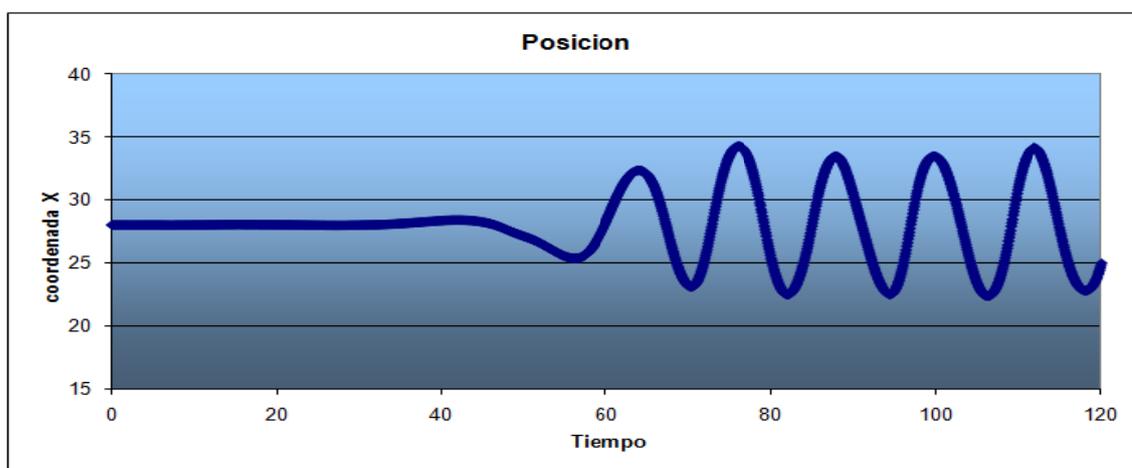


Fig. 4.3.2.5 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H6T8 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 8$  segundos

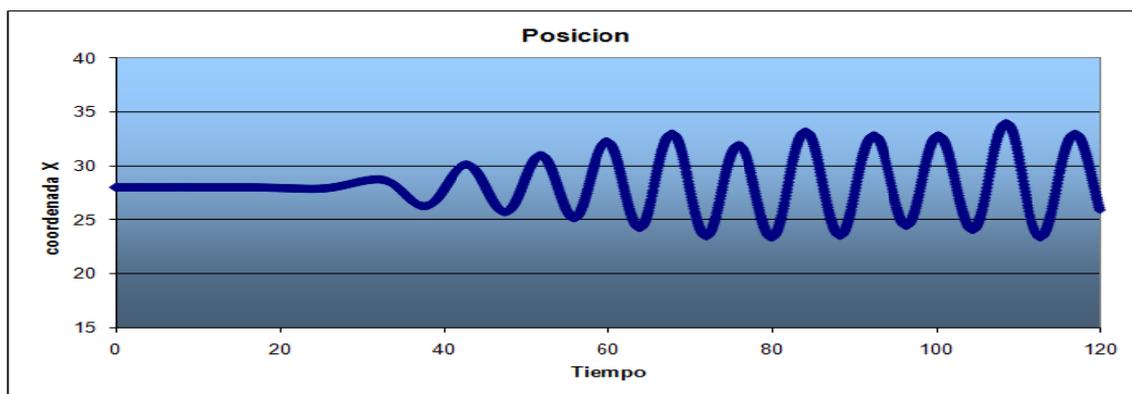


Fig. 4.3.2.6 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H6T12 - Altura de ola cuatro metros con periodo  $T = 12$  segundos

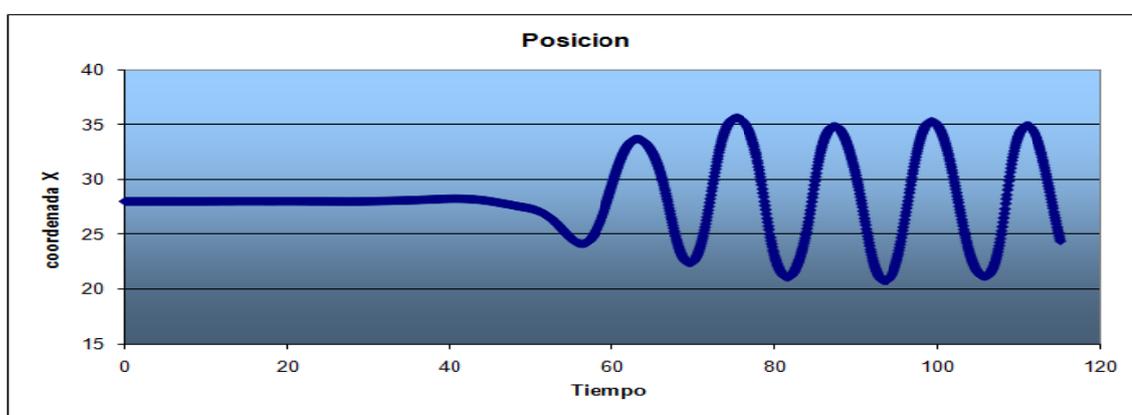


Fig. 4.3.2.7 Posición CG del péndulo - Eje X

- Caso H6T12 - Péndulo con movimiento impedido - Análisis de fuerzas

En las figuras siguientes se muestra la evolución de las fuerzas y el momento aplicado sobre el centro de gravedad del dique en cada instante de tiempo.

Conociendo esas fuerzas podemos estimar las fuerzas a aplicar en los ensayos posteriores en los que se simula la acción de conjunto de pistones hidráulicos.

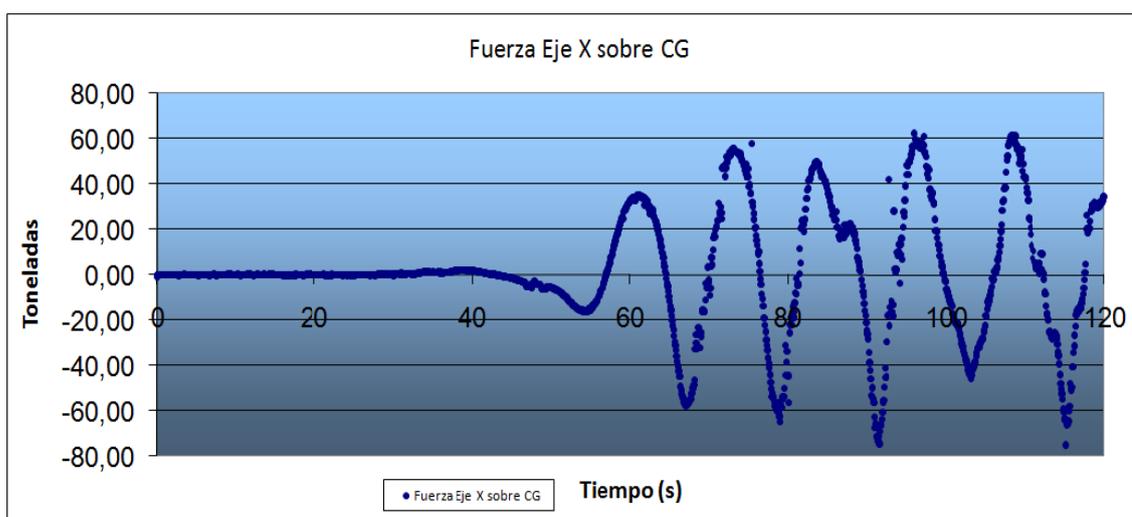


Fig. 4.3.2.8 Fuerzas sobre CG del péndulo - Eje X

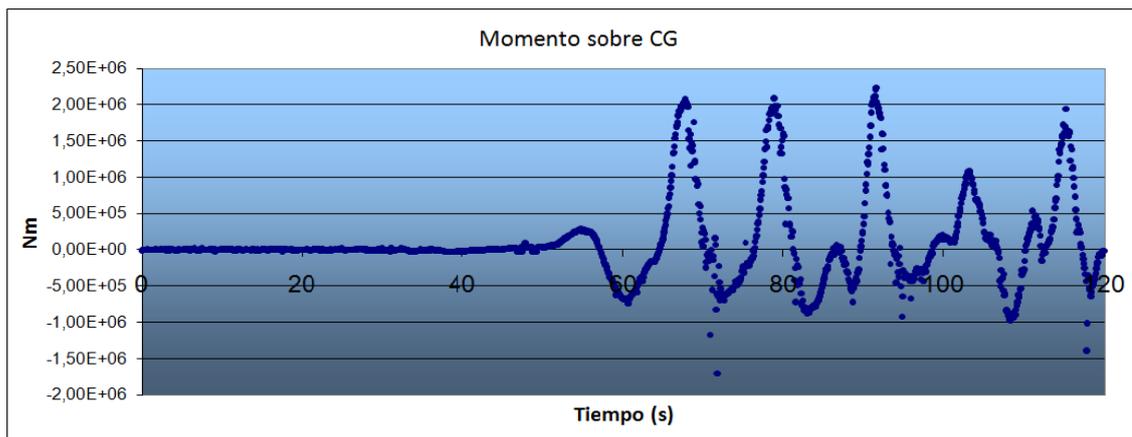


Fig. 4.3.2.9 Momentos sobre CG del péndulo - Eje X

- Caso H6T12 - Comparación de los movimientos del CG para distintas fuerzas.

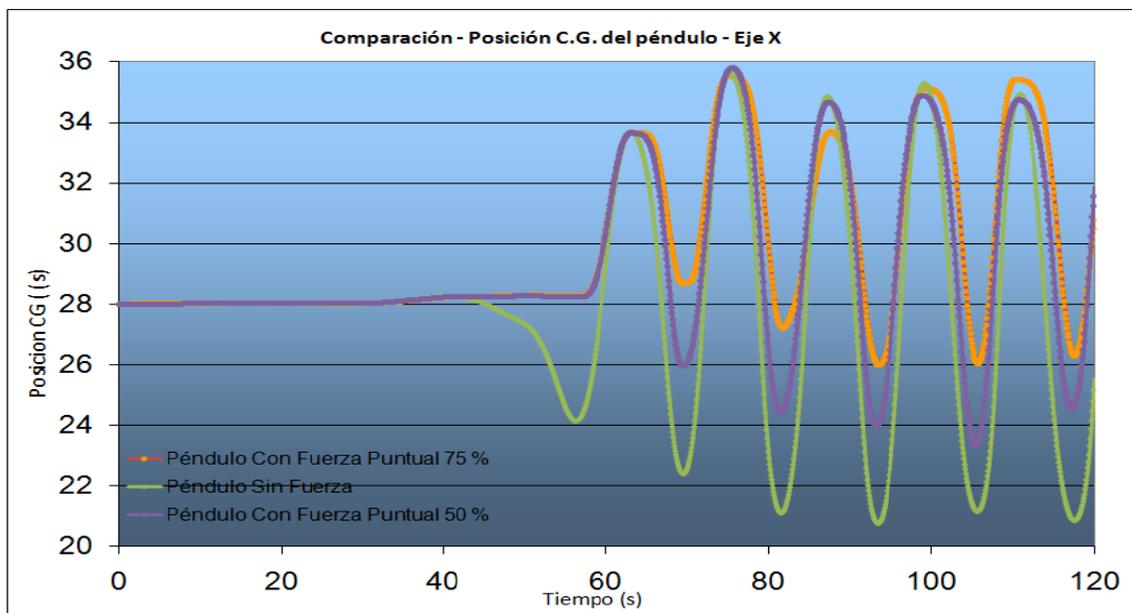


Fig. 4.3.2.10 Fuerzas sobre CG del péndulo - Eje X

- Caso H6T12 - Comparación de los movimientos del CG en el péndulo inverso con distintos valores de fuerza puntual aplicada.

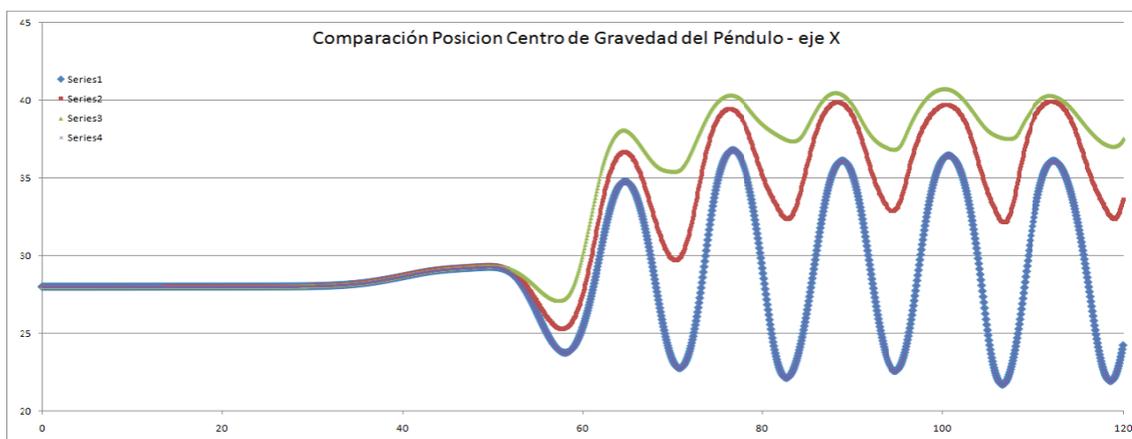


Fig. 4.3.2.11 Fuerzas sobre CG del péndulo - Eje X

#### 4.4.- Resultados referentes al campo de velocidades y presiones en el entorno del dique de láminas

##### 4.4.1.- Ensayos con longitud de piscina inicial

- Caso H2T6

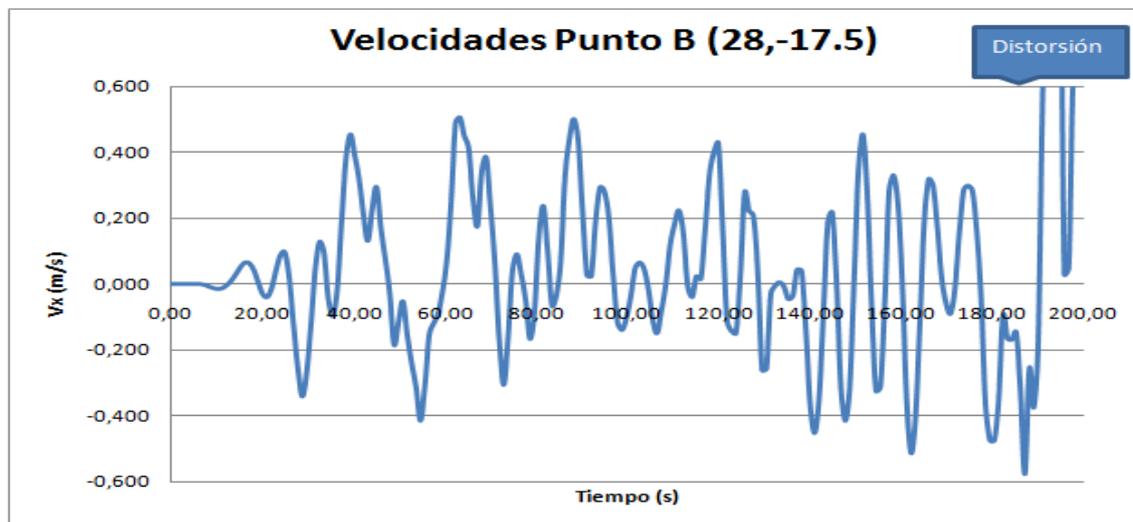


Fig. 4.4.1.1 Campo de velocidades bajo péndulo

Los primeros ensayos disponen de un tiempo de simulación demasiado elevado (200 segundos) teniendo en cuenta la escasa longitud del canal de propagación de oleaje lo que provoca una gran distorsión de los resultados a partir de un cierto instante.

Aun así, el orden de magnitud obtenido es válido y es de utilidad para tener una primera aproximación acerca del comportamiento del fluido en el entorno del dique.

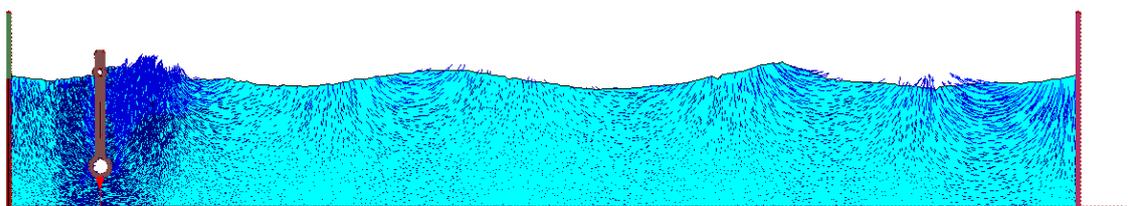


Fig. 4.4.1.2 Campo de velocidades en el canal

La figura 4.4.1.2 muestra el campo de velocidades a lo largo del canal para un instante  $t$ . Puede apreciarse la mayor densidad de elementos en el entorno proximo al dique de láminas.

- Caso H2T8

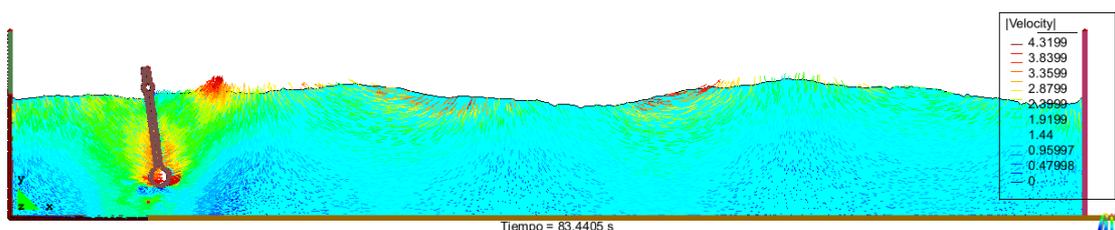


Fig. 4.4.1.3 Campo de velocidades en el canal

Al incrementar el periodo de la ola generada se modifican visiblemente los campos de velocidades actuantes tal como muestra la figura 4.4.1.4, así como la agitación en la superficie de la lámina libre.

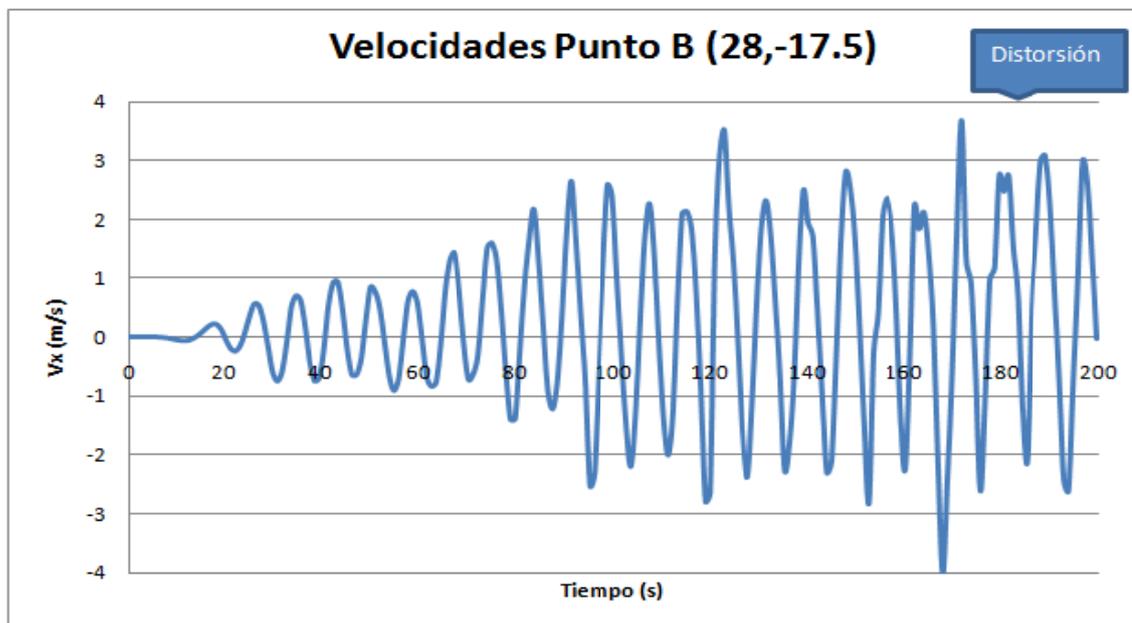


Fig. 4.4.1.4 Campo de velocidades bajo péndulo

Al incrementar el periodo de la ola generada se modifican visiblemente los campos de velocidades actuantes así como la agitación en la superficie de la lámina libre.

La figura 4.4.1.5 refleja el perfil de velocidades en la longitud que separa la base del péndulo del fondo del canal para el instante  $t = 83$  seg.

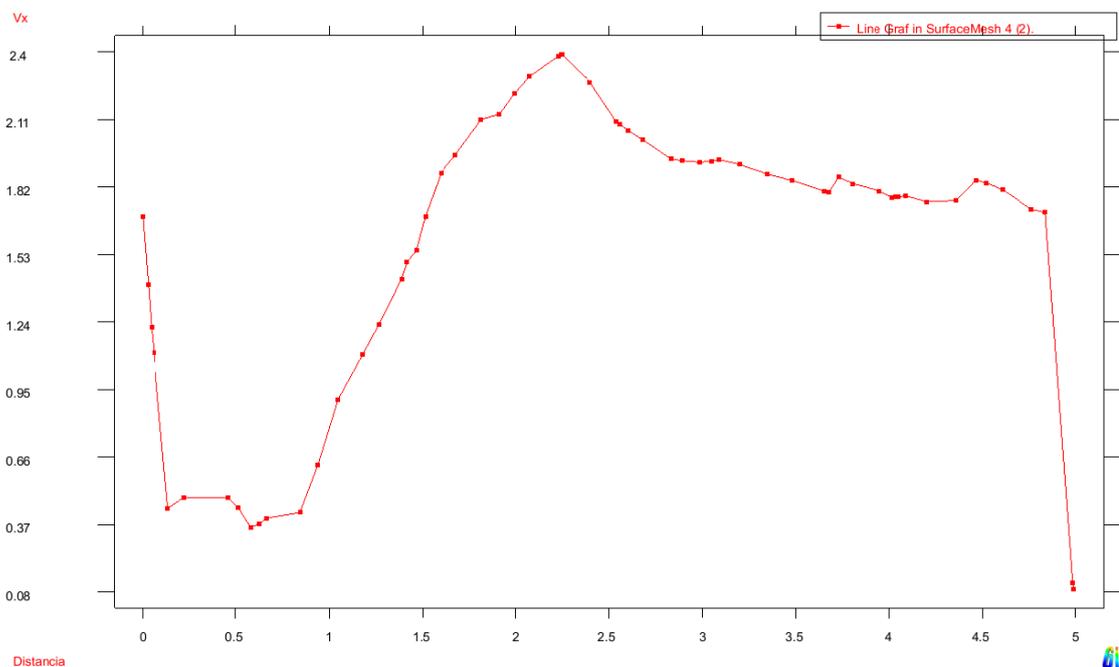


Fig. 4.4.1.5 Perfil de velocidades bajo péndulo

Queda confirmado de esta forma que el comportamiento del fluido en esa zona dista mucho de poder ser considerado regular.

- Caso H4T6

Contrariamente a lo que podría haberse considerado previamente, al aumentar la altura pero reduciendo el periodo del oleaje, el campo de velocidades que se obtienen son, desde un punto de vista aproximado, la mitad de las que se mostraban en el caso H2T8. El gráfico 4.4.1.6 muestra el registro de velocidades en B.

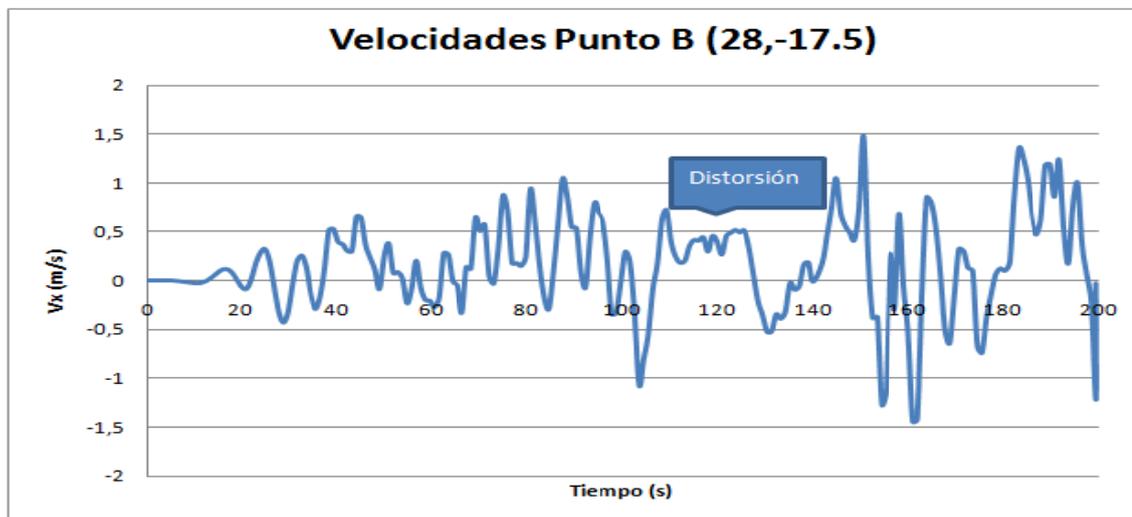


Fig. 4.4.1.6 Campo de velocidades bajo péndulo

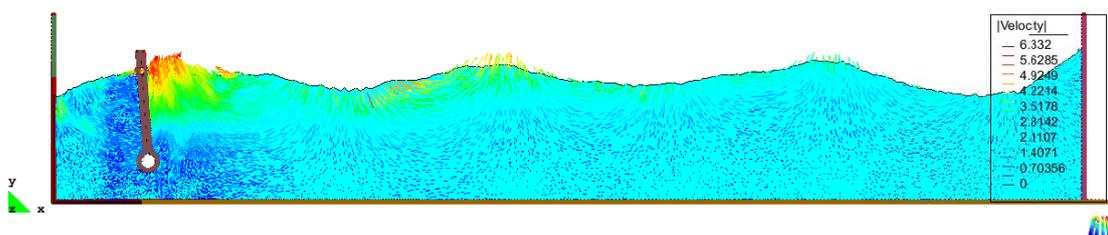


Fig. 4.4.1.7 Campos de velocidades en el canal

La imagen 4.4.1.7 muestra el perfil de la lámina libre de agua y los vectores de velocidad en un instante de la simulación. Puede apreciarse que la velocidades en superficie son muy superiores a las registradas en la zona bajo el dique.

- Caso H4T8

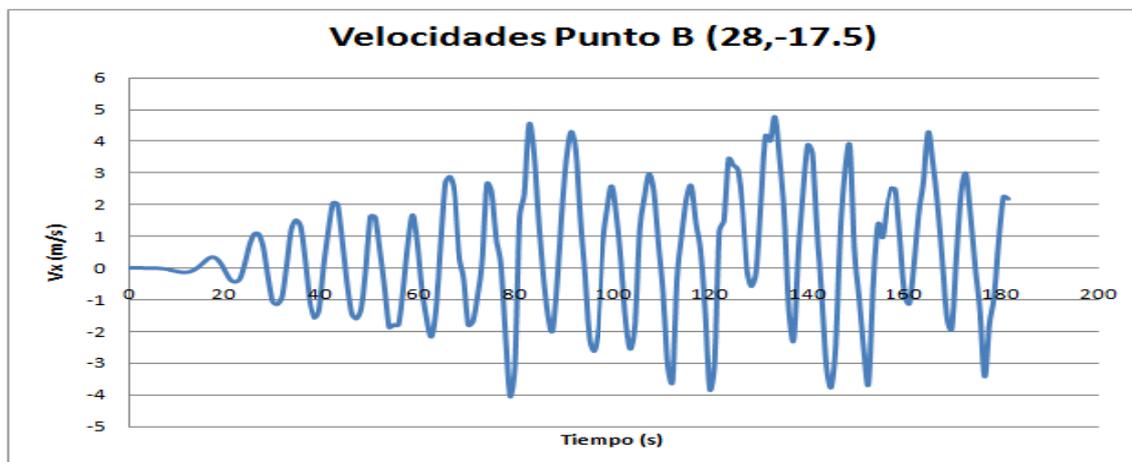


Fig. 4.4.1.8 Campo de velocidades bajo péndulo

Análogamente al caso H2T8, al incrementar el periodo el registro de las velocidades también aumenta de forma significativa tal y como se muestra en el gráfico 4.4.1.8 anterior.

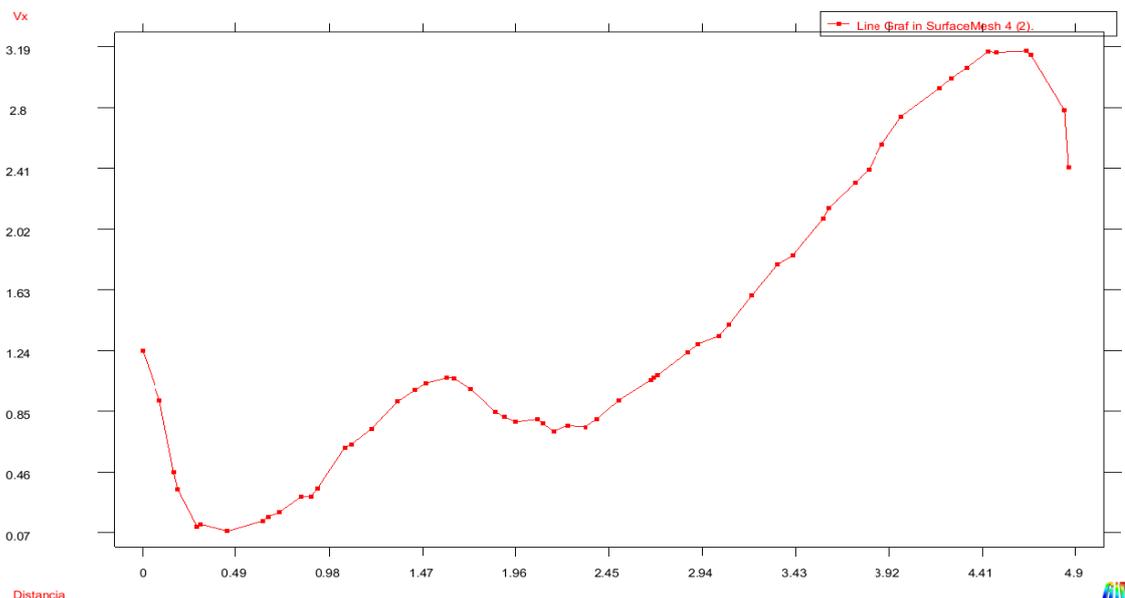


Fig. 4.4.1.9 Perfil de velocidades entre péndulo y fondo.

- Caso H4T12

Si se incrementa el periodo hasta  $T = 12$  segundos puede apreciarse una ligera rebaja en las velocidades obtenidas. Aunque puede observarse un pico de 6m/s en la corriente de entrada de agua hacia aproximadamente los 38 segundos de simulación.

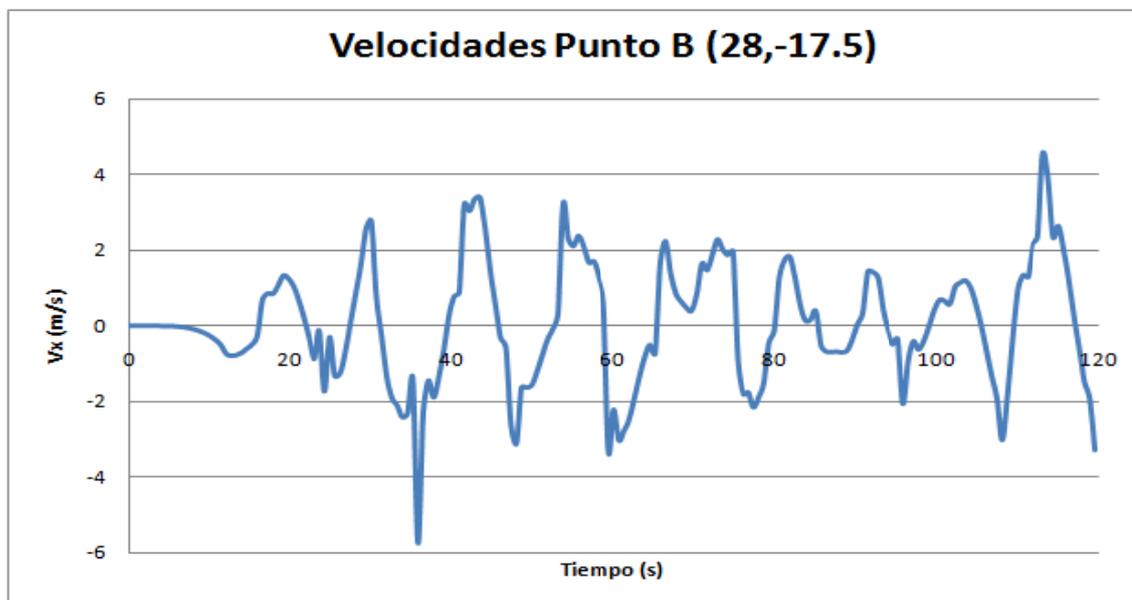


Fig. 4.4.1.10 Campo de velocidades bajo péndulo

En las figuras siguientes puede distinguirse la generación de vórtices tanto delante del dique como en el trasdós del mismo como mecanismos de disipación de energía.

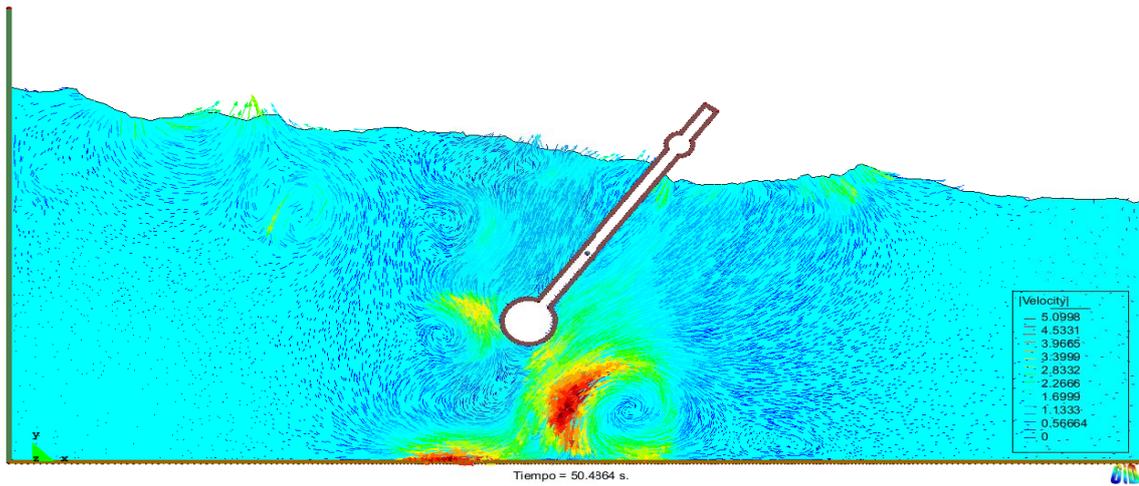


Fig. 4.4.1.11 Vórtices de disipación.

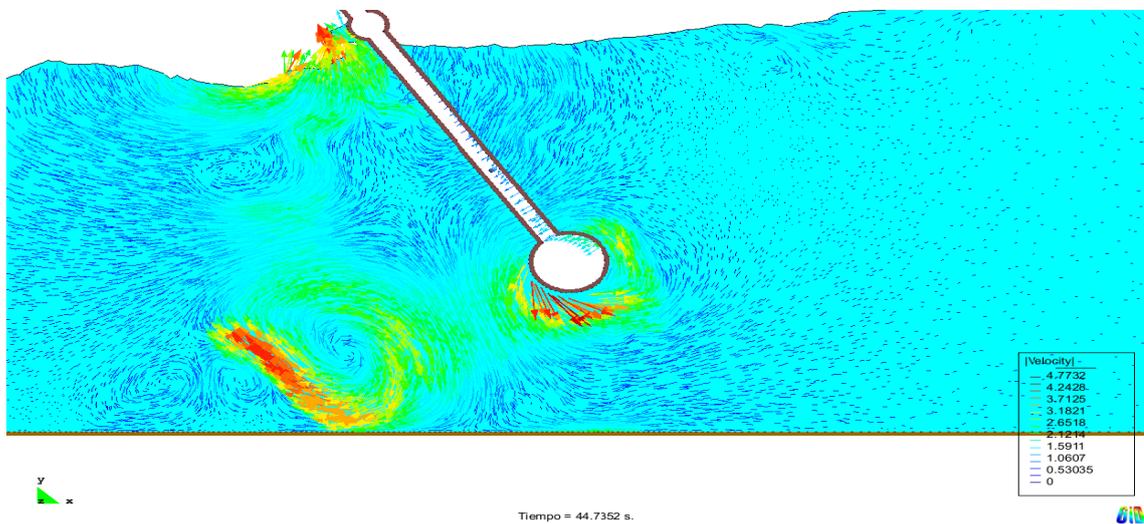


Fig. 4.4.1.12 Vórtices de disipación.

- Caso H6T8

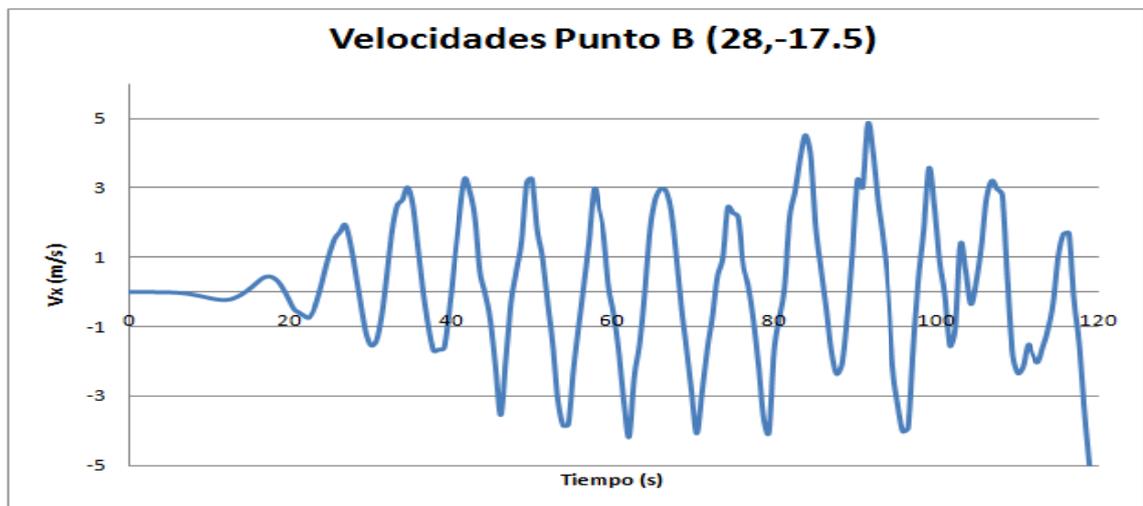


Fig. 4.4.1.13 Campo de velocidades bajo péndulo

Los ensayos con mayor altura de oleaje de todos los simulados ( 6 metros) son los que, obviamente, generan una mayor agitación en el trasdós del dique. En la figura 4.4.1.14 se aprecia la oscilación de la lamina libre y la generación de torbellinos en el trasdós del dique.

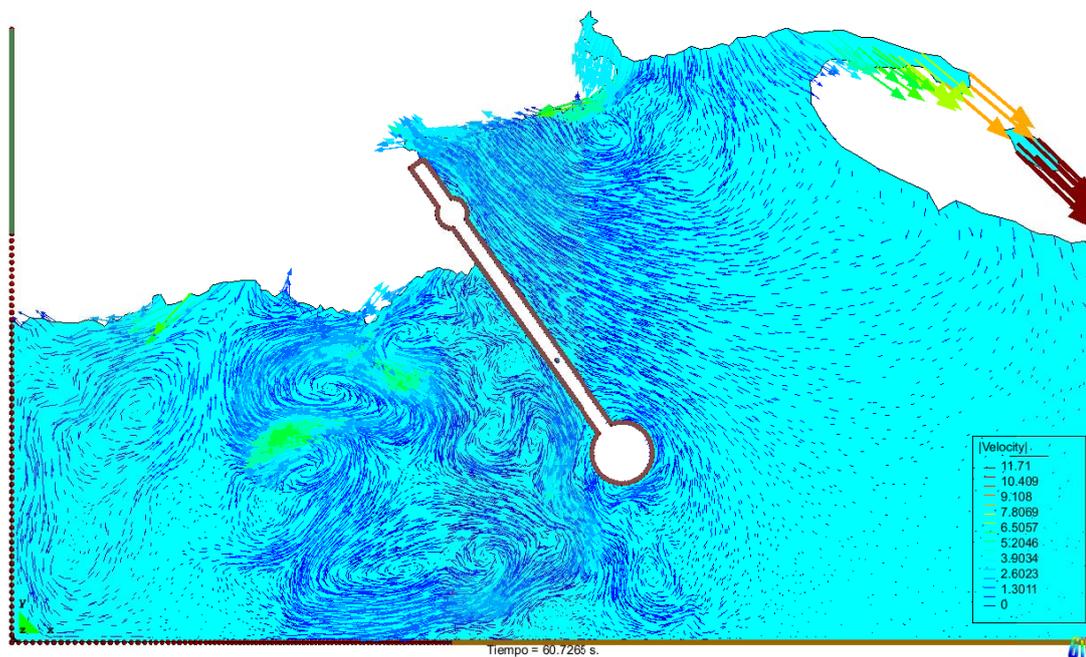


Fig. 4.4.1.14 Campo de velocidades en el entorno del dique

Aun así, la cota alcanzada en la pared se mantiene más o menos estable los primeros 80 segundos de simulación (en el caso de H6T8). Los picos alcanzados en el caso H6T12 son ligeramente superiores y se pierde la regularidad que se apreciaba en el caso H6T8. Eso podría deberse a la mayor similitud del oleaje de periodo  $T = 8$  segundos con el periodo propio de oscilación del dique.

- Caso H6T12

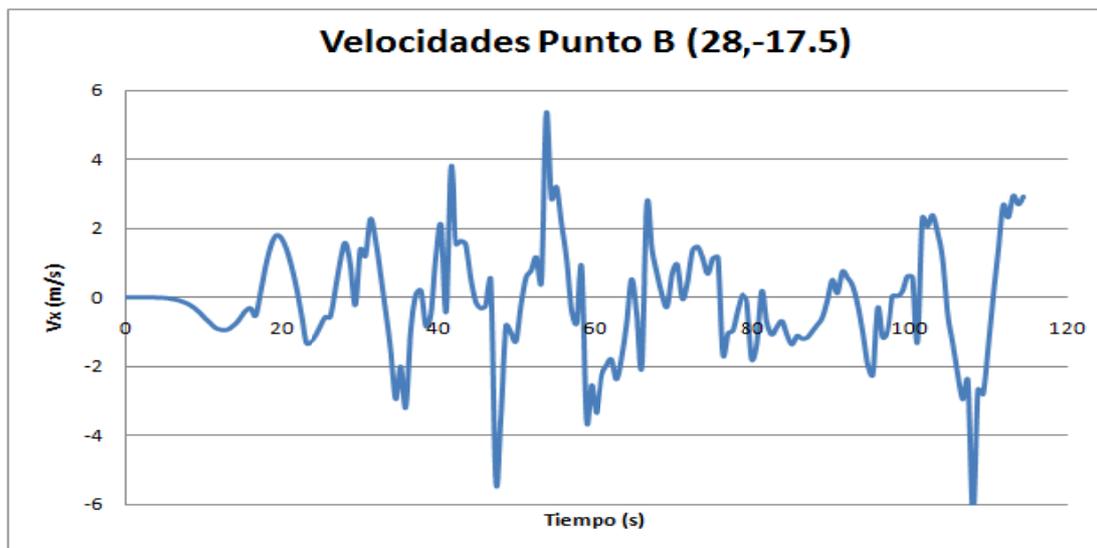


Fig. 4.4.1.15 Campo de velocidades en el entorno del dique

Las siguientes imágenes muestran los campos de velocidades más intensos en el fondo del canal y que representan un riesgo al considerar la erosión del canal.

Las velocidades alcanzadas en las corrientes de salida se sitúan alrededor de los 5,8 m/s mientras que el campo de velocidades de flujo hacia el interior del dique llega a alcanzar los 7 m/s aproximadamente.

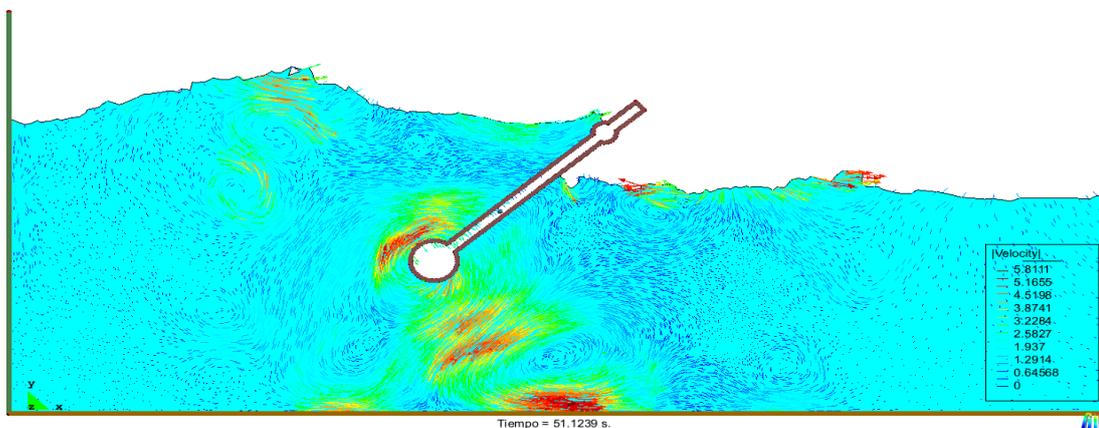


Fig. 4.4.1.16 Campo de velocidades en el entorno del dique

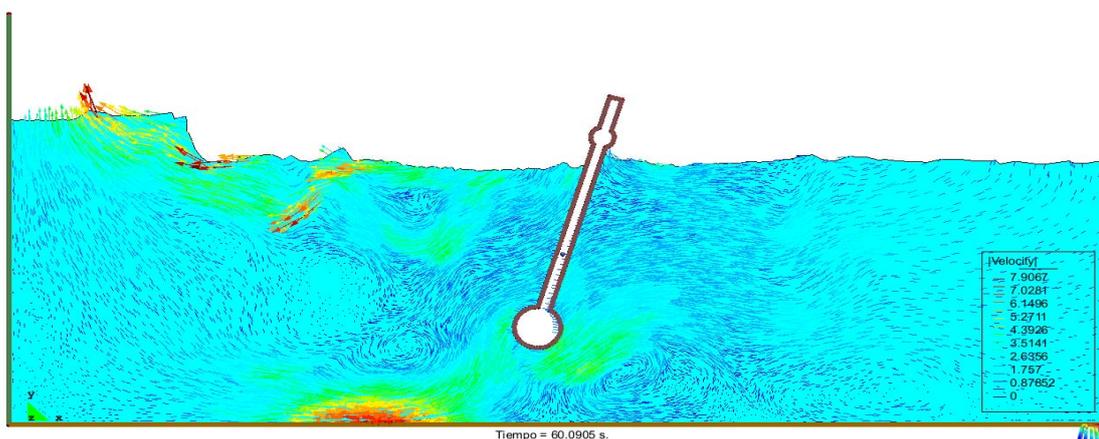


Fig. 4.4.1.17 Campo de velocidades en el entorno del dique

La diferencia de presiones a ambos lados del dique es el generador de esos flujos de corriente, tal y como muestra la figura 4.4.1.18

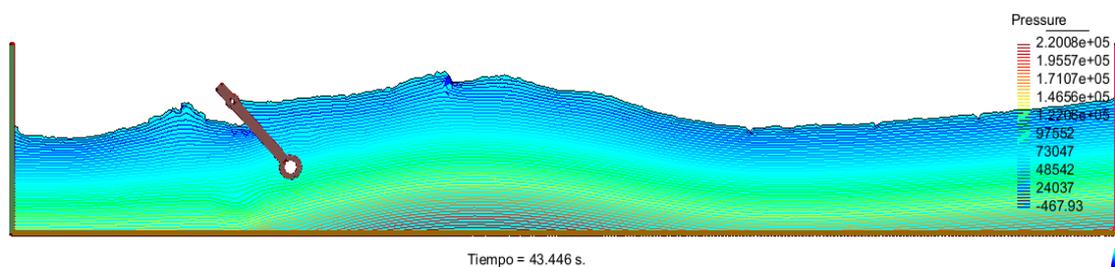


Fig. 4.4.1.18 Campo de presiones

#### 4.4.2.- Ensayos con longitud de piscina modificada

- Caso H2T6

Una vez modificada la geometría del modelo igualando la distancia del canal de propagación de oleaje a 3,5 veces la longitud de onda del caso a considerar, obtenemos una serie de nuevos resultados.

En el caso del oleaje de menor intensidad con altura de ola de 2 metros y periodo de 6 segundos, se observan resultados muy similares a los obtenidos con la propuesta inicial.

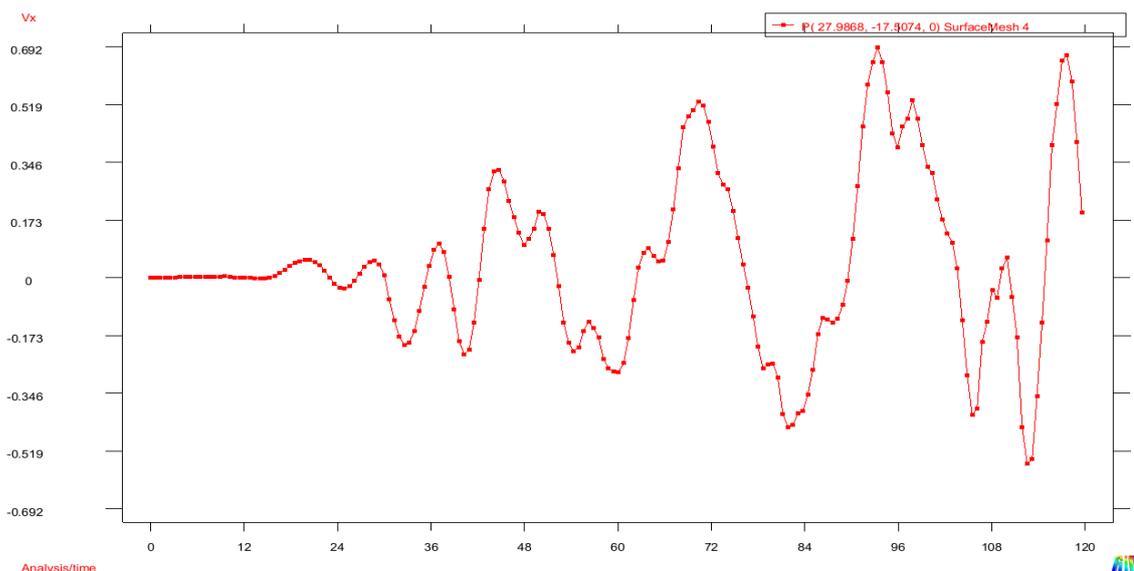


Fig. 4.4.2.1 Registro de velocidades en B

- Caso H2T8

En este caso si se observan cambios significantes en las velocidades obtenidas que resultan menores manteniéndose por debajo de los 1,5 m/s

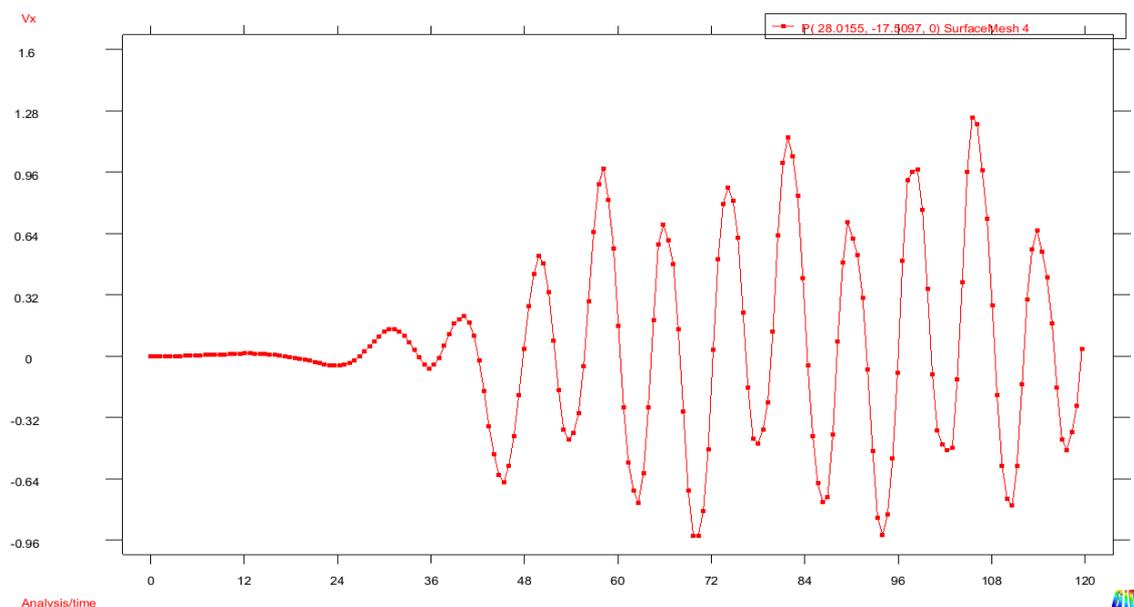


Fig. 4.4.2.2 Registro de velocidades en B

- Caso H4T6

Al reducir el periodo se alcanzan velocidades menores que en el caso de altura 2 metros, tal como también ocurría con la geometría inicial. En este caso las velocidades obtenidas se mantienen por debajo de 1m/s

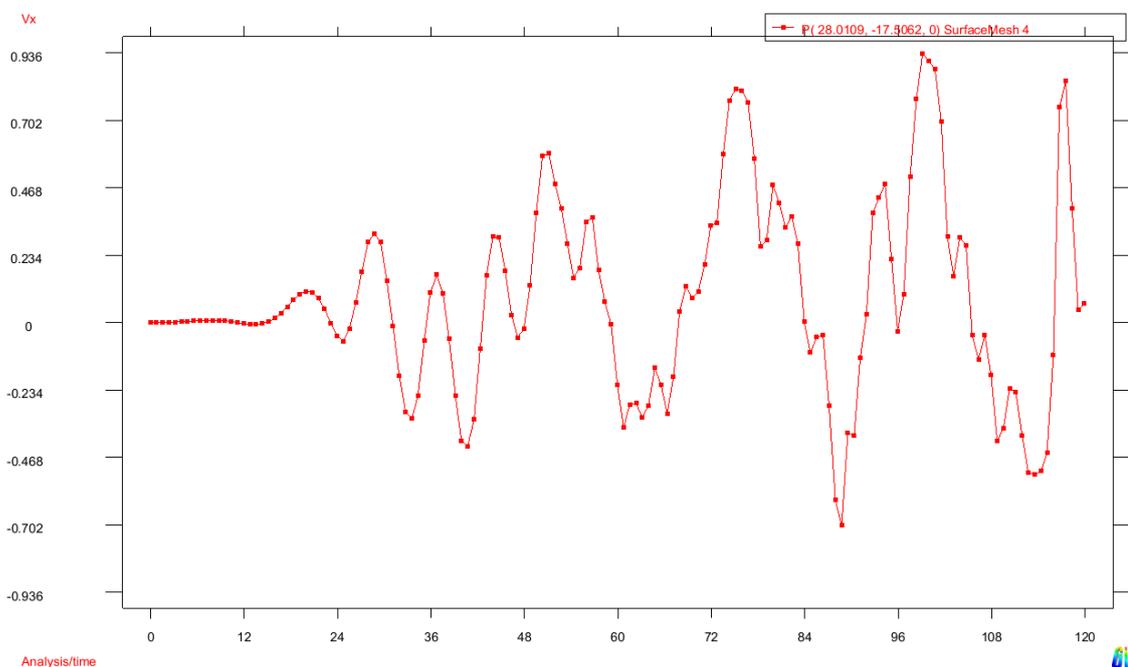


Fig. 4.4.2.3 Registro de velocidades en B

La figura 4.4.2.4 muestra el campo de velocidades en t= 76 segundos. Las velocidades se mantienen bajas en el entorno del dique.

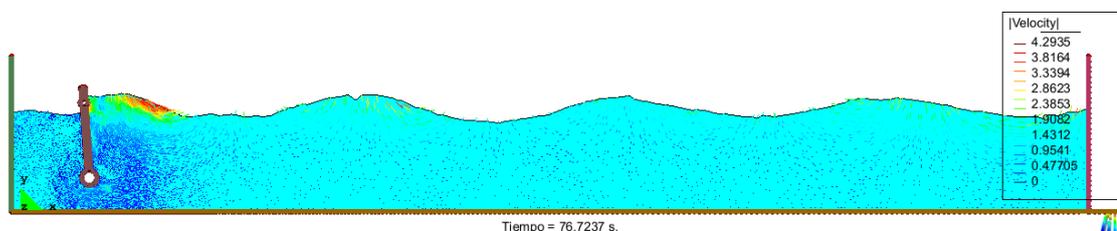


Fig. 4.4.2.4 Campo de velocidades

- Caso H4T8

Aumentando el periodo se alcanzan picos de velocidad de casi 3,5 m/s. Las figuras 4.4.2.6 y 4.4.2.7 muestran el registro de velocidades en X para este caso y su campo de presiones.

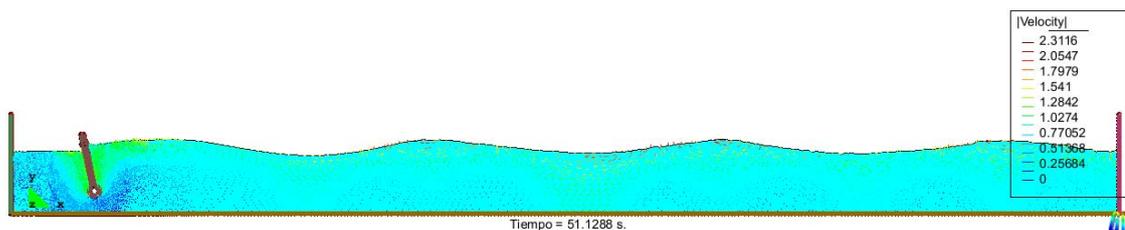


Fig. 4.4.2.5 Campo de velocidades

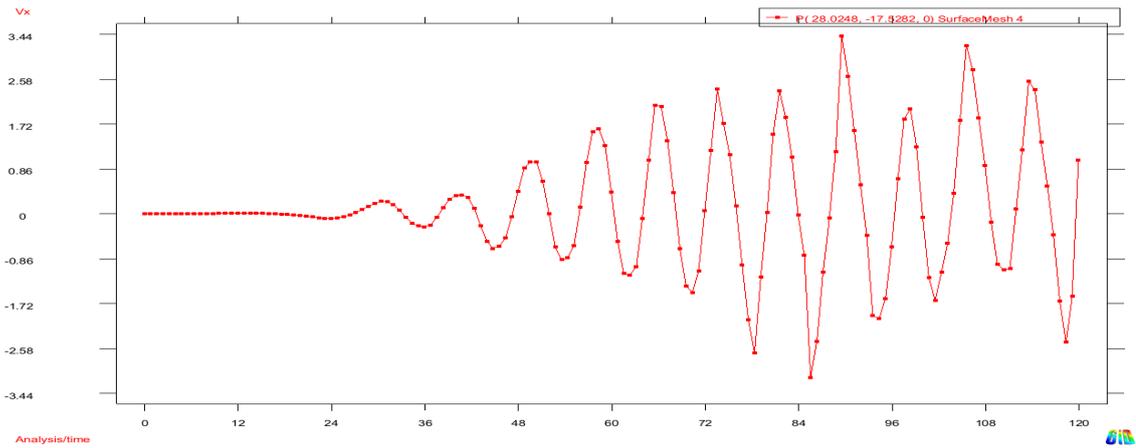


Fig. 4.4.2.6 Registro de velocidades en B

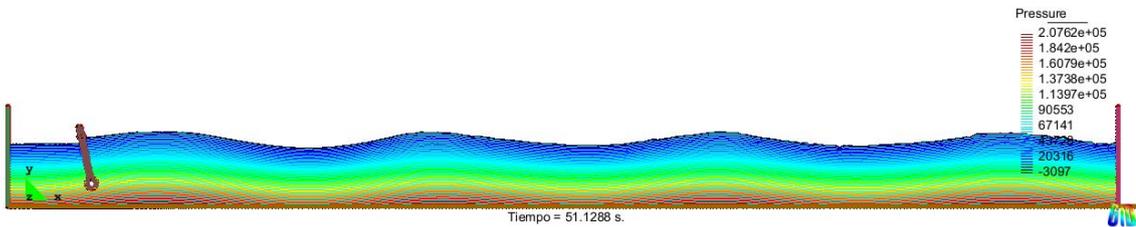


Fig. 4.4.2.7 Campo de presiones

- Caso H4T12

Los picos de velocidad obtenidos en este ensayo alcanzan los 5,6 m/s siendo las corrientes de salida claramente superiores a las de entrada hacia el interior de la piscina en todo momento

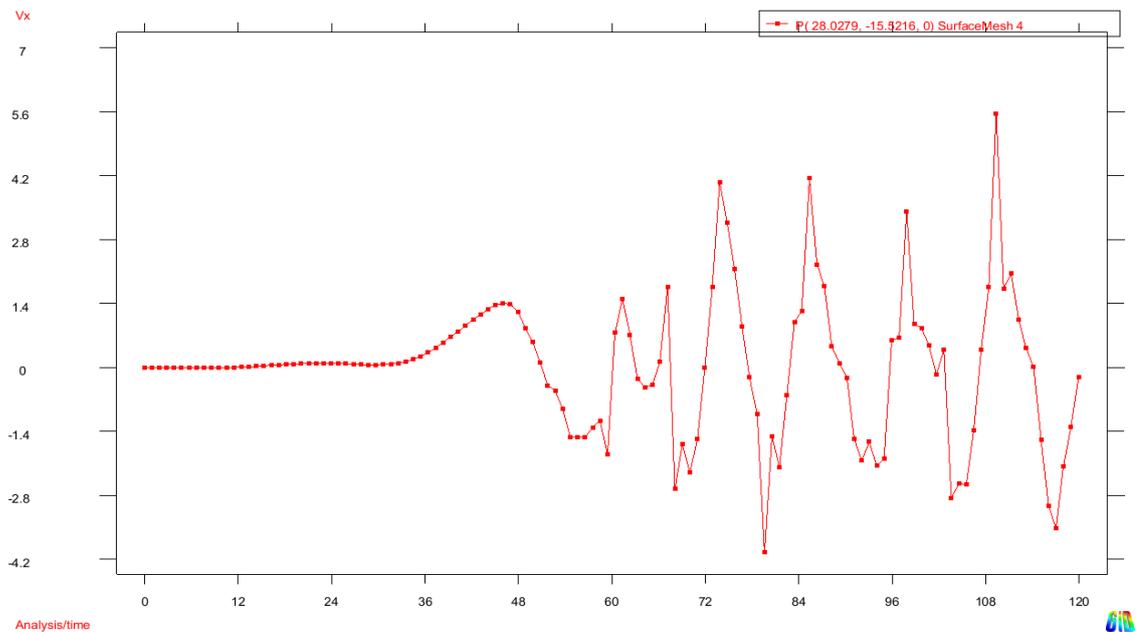


Fig. 4.4.2.8 Registro de velocidades en B

Se generan vórtices delante del péndulo dadas las velocidades alcanzadas en algunos instantes.

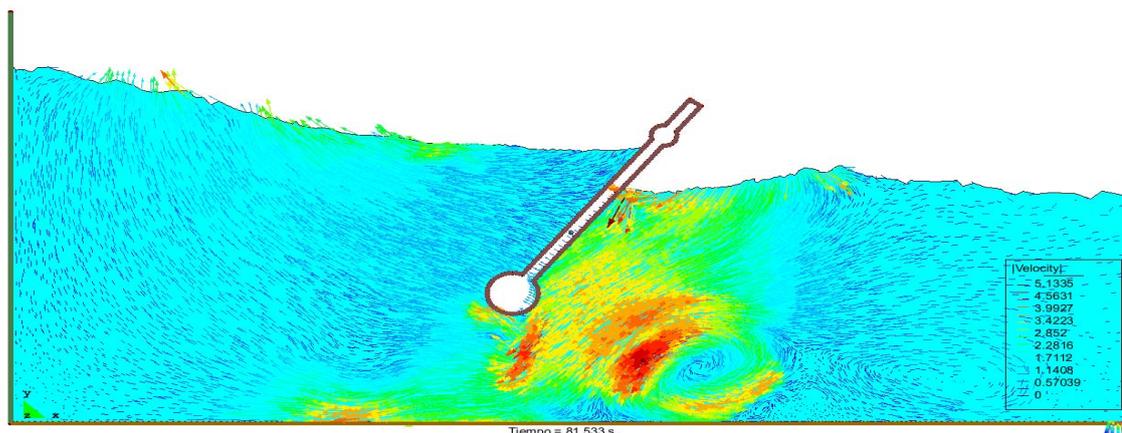


Fig. 4.4.2.9 Vórtice delante del dique

- Caso H6T8

Aumentando la altura y reduciendo el periodo, se consigue disminuir las velocidades bajo dique, no llegando en este caso a alcanzar los 3 m/s.

Las figuras 4.4.2.10 y 4.4.2.11 muestran el registro de velocidades en X para este caso y su campo de presiones.

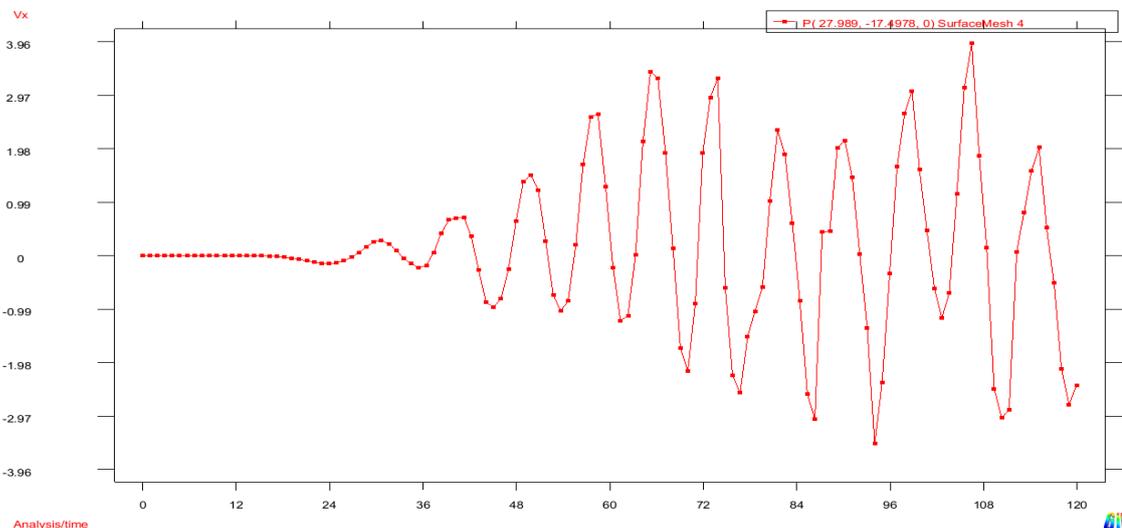


Fig. 4.4.2.10 Registro de velocidades en B

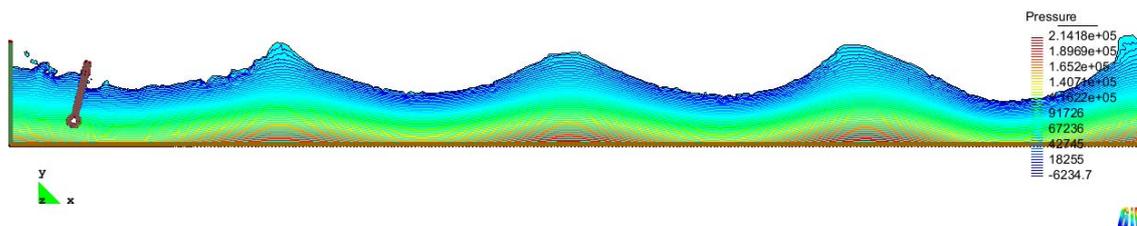


Fig. 4.4.2.11 Campos de presión

- Caso H6T12

El caso más crítico en el que se alcanzan mayores velocidades por lo que se decide adoptar esas condiciones de oleaje en las geometrías alternativas que se proponen a de ahora en adelante.

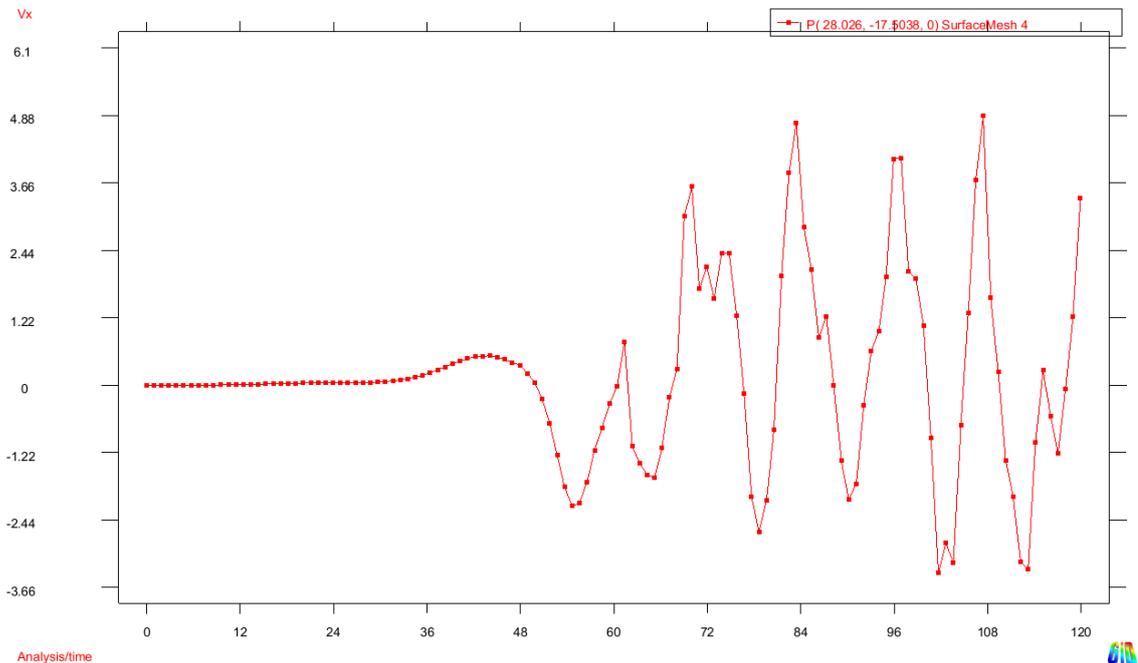


Fig. 4.4.2.12 Registro de velocidades en B

Aparecen múltiples vórtices en todo el entorno del dique pendular y en el interior de la piscina tal y como muestra la figura siguiente. Además casi se alcanza la cota de coronación en la pared de fondo.

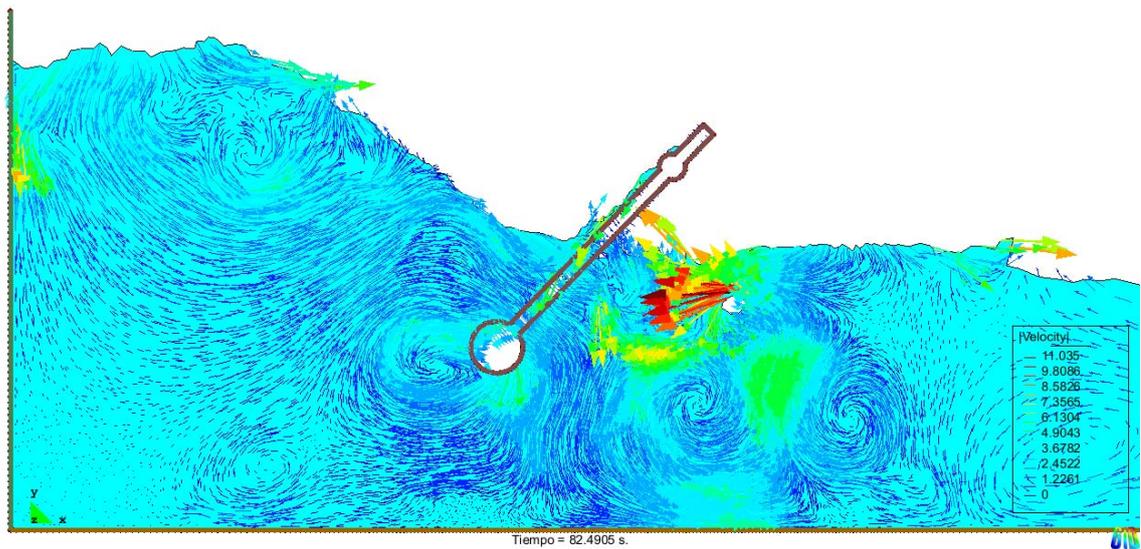


Fig. 4.4.2.13 Generación de múltiples vórtices en la zona próxima al dique

Por otra parte, las velocidades del fondo dejan claro que existe un alto riesgo de erosión en el fondo del canal en la zona próxima al péndulo, a unos 15 - 20 metros delante del mismo.

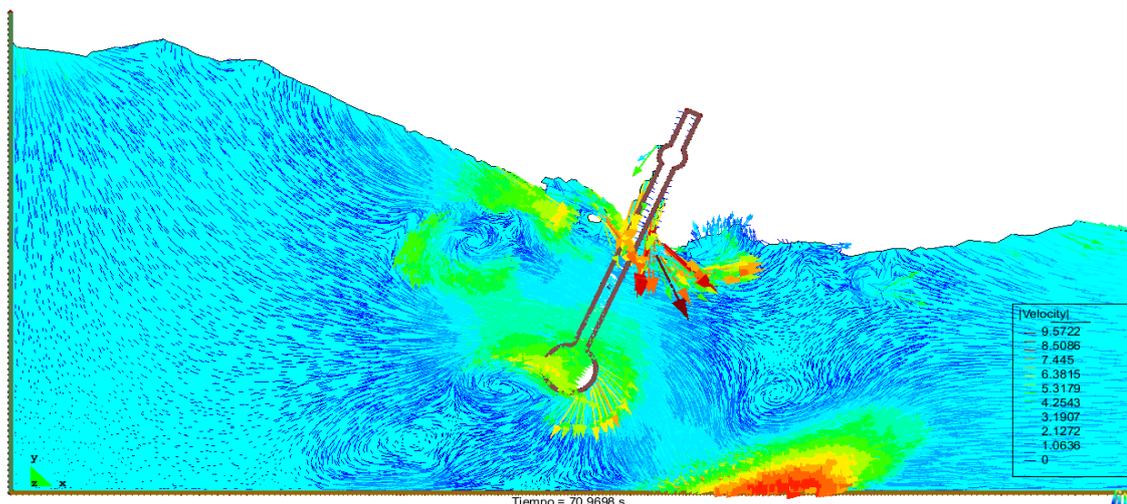


Fig. 4.4.2.14 Riesgo de erosión en el fondo del canal

La figura 4.4.2.15 muestra el campo de presiones a lo largo del canal.

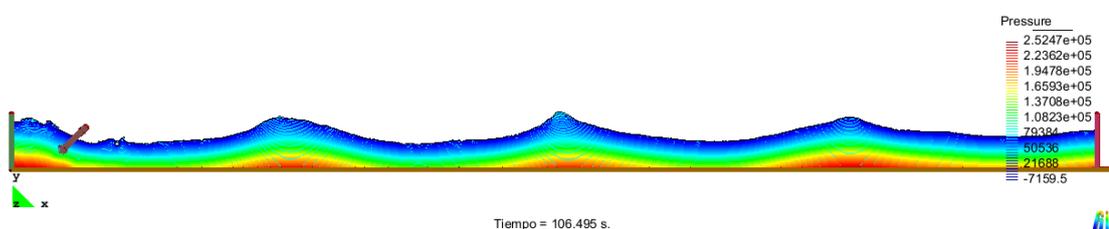


Fig. 4.4.2.15 Riesgo de erosión en el fondo del canal

- Caso H6T12 - Péndulo con movimiento impedido.

Al fijar el movimiento del dique, por ejemplo en caso de que se decida instalar un sistema de turbinas de fondo y bloquear el movimiento del dique en los periodos que estén generando energía, se pueden estimar las velocidades máximas que se producirán en el fondo del canal. Por otra parte este ensayo nos es de utilidad para estimar la fuerza y la constante K en ensayos posteriores.

Tal y como se veía en casos anteriores, los flujos de salida tienen siempre una velocidad superior a los de entrada hacia la piscina interior.

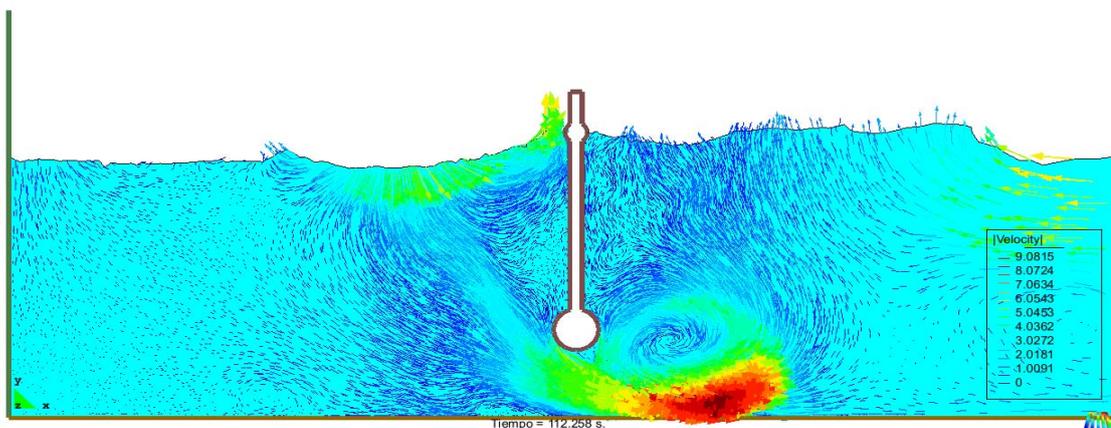


Fig. 4.4.2.16 Corrientes de salida

TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.

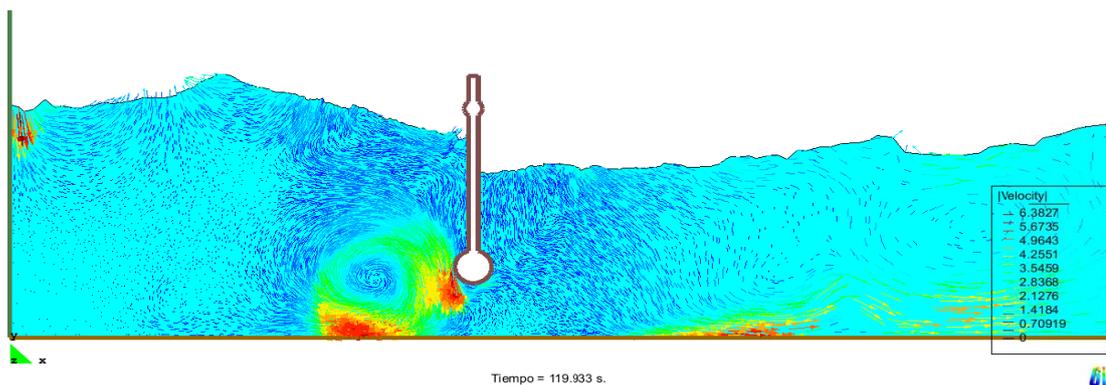


Fig. 4.4.2.16 Corrientes de entrada

La figura 4.4.2.17 muestra el registro de velocidades en este caso, siendo lógicamente superiores al caso con el dique libre.

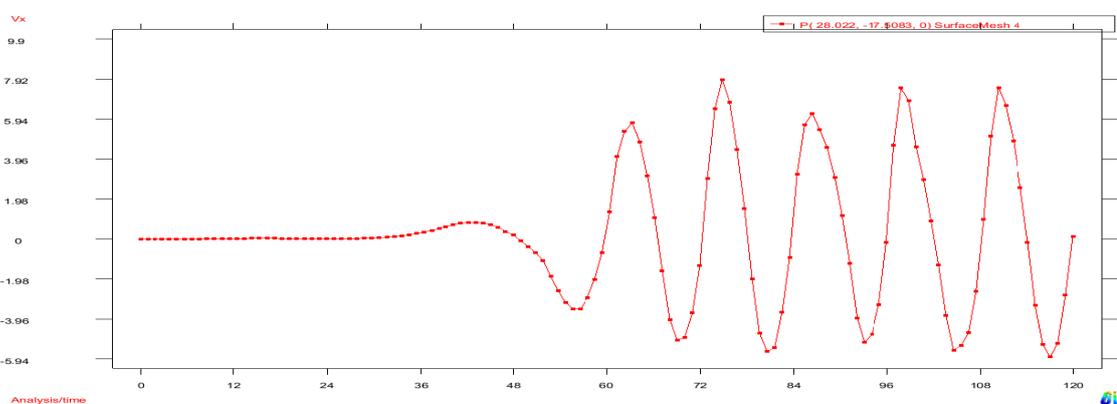


Fig. 4.4.2.16 Corrientes de entrada

#### 4.4.3.- Ensayos con fuerza puntual aplicada.

Se propone introducir una fuerza puntual que impida parcialmente el movimiento oscilante del dique pendular, simulando un sistema de pistones.

Se realizan diferentes ensayos variando la intensidad y el sentido de la fuerza aplicada. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

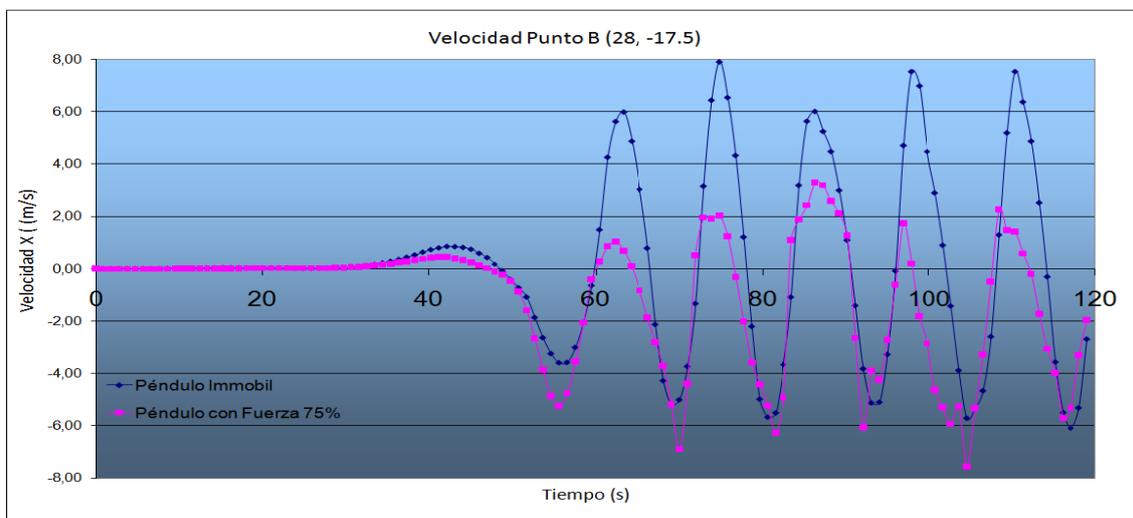


Fig. 4.4.3.1 Comparación de velocidades al aplicar una fuerza puntual.

Con la aplicación de una fuerza en sentido contrario al empuje del oleaje equivalente al 75% de la fuerza del oleaje actuante se consigue una reducción significativa de las velocidades bajo péndulo en comparación al caso con el dique totalmente fijado.

Al contrastarlo con el caso de aplicar dos fuerzas al 50% que actúen tal y como se especifica en el capítulo 3 se observa que la aplicación de una única fuerza de mayor intensidad sigue siendo mejor alternativa, tal como muestra el siguiente gráfico.

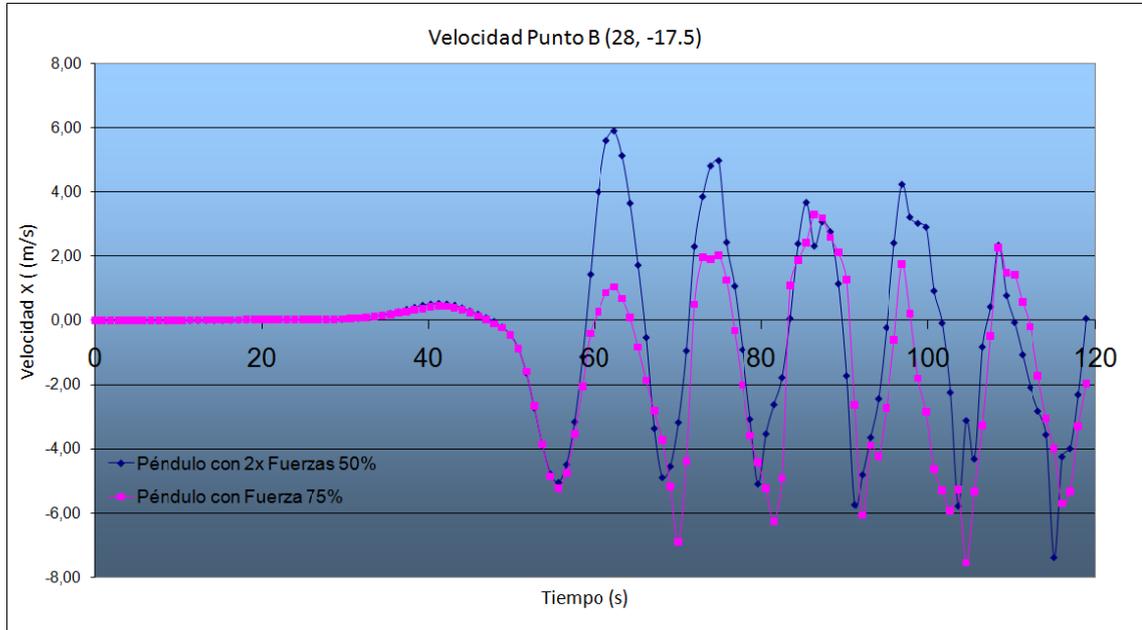


Fig. 4.4.3.2 Comparación de velocidades al aplicar una fuerza puntual.

Las siguiente imagen puede observarse la diferencia de altura de la cota de agua a ambos lados del dique debida a la aplicación de esa fuerza puntual y el efecto en el campo de velocidades que se produce.

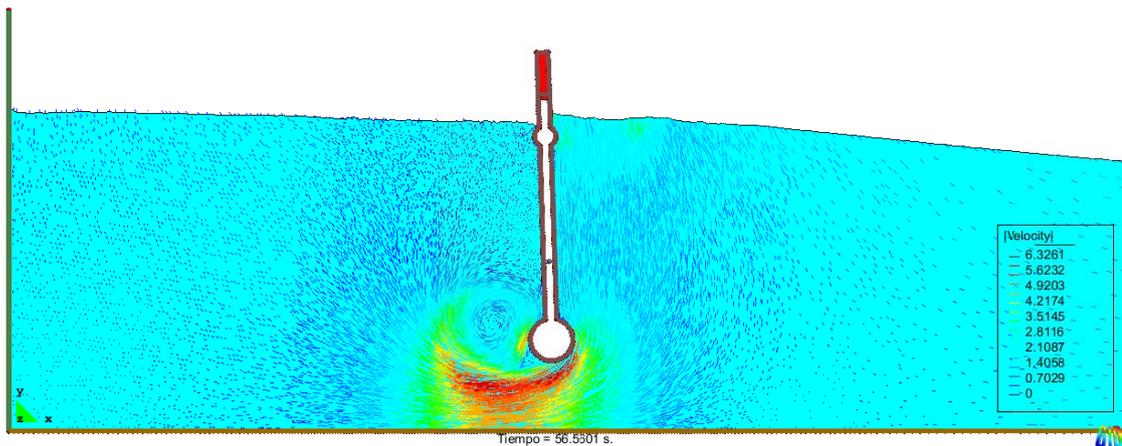


Fig. 4.4.3.3 Aplicación de una fuerza al 75%

Incluso habiendo aumentado la cota de coronación del dique, en la figura 4.4.3.4 puede observarse como el oleaje sobrepasa por encima.

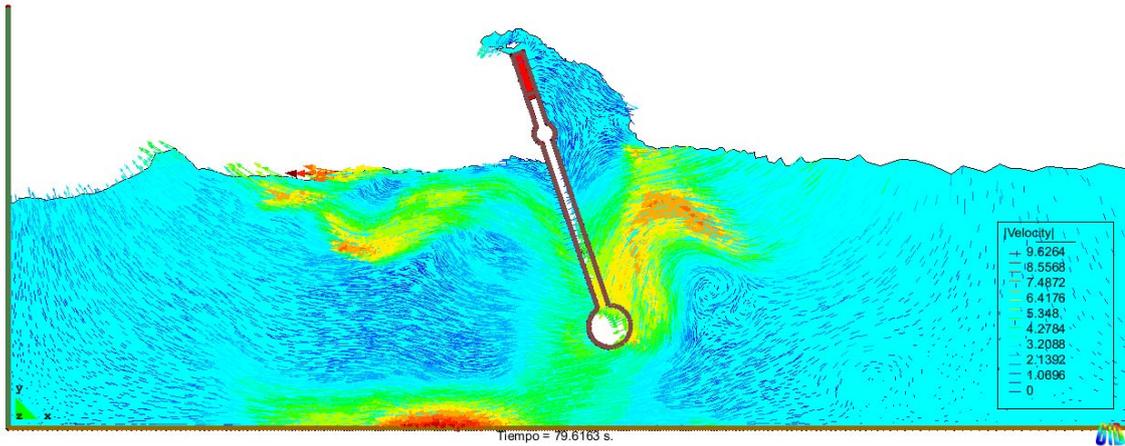


Fig. 4.4.3.4 Aplicación de una fuerza al 75%

El agua en el interior de la piscina alcanza los límites de la pared de fondo tal y como se muestra en el registro de alturas de superficie libre para este caso. Por otra parte la significativa diferencia de altura de lamina libre a ambos lados del dique confirma que existe una fuerza actuante.

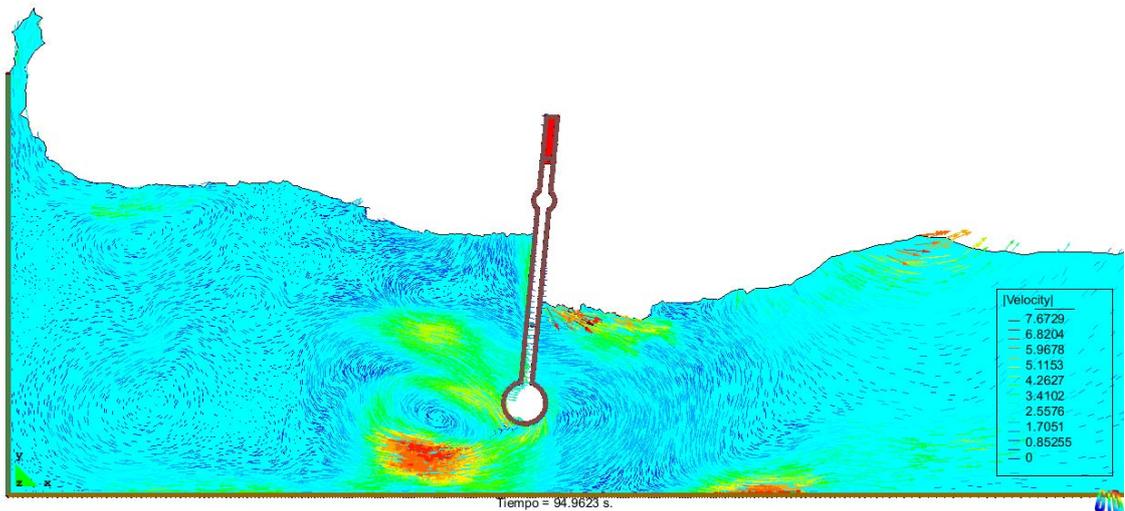


Fig. 4.4.3.5 Aplicación de una fuerza al 75%

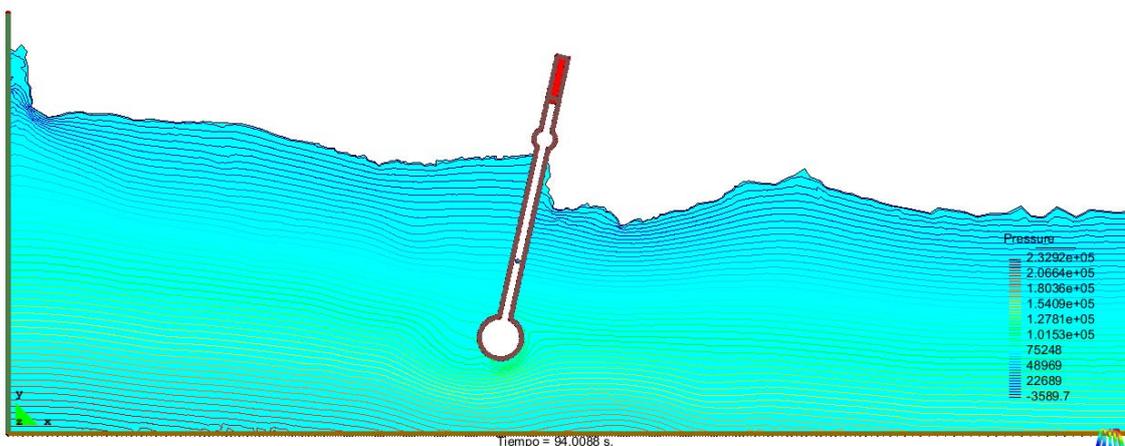


Fig. 4.4.3.6 Perfil de presiones en el entorno del dique con fuerza al 75%

Si se comparan las velocidades registradas bajo péndulo ( $x=28$ ) con las registradas delante del mismo ( $x=45$ ) puede comprobarse que en la corriente de salida, las velocidades superan a las que se dan debajo del dique (figura 4.4.3.7)

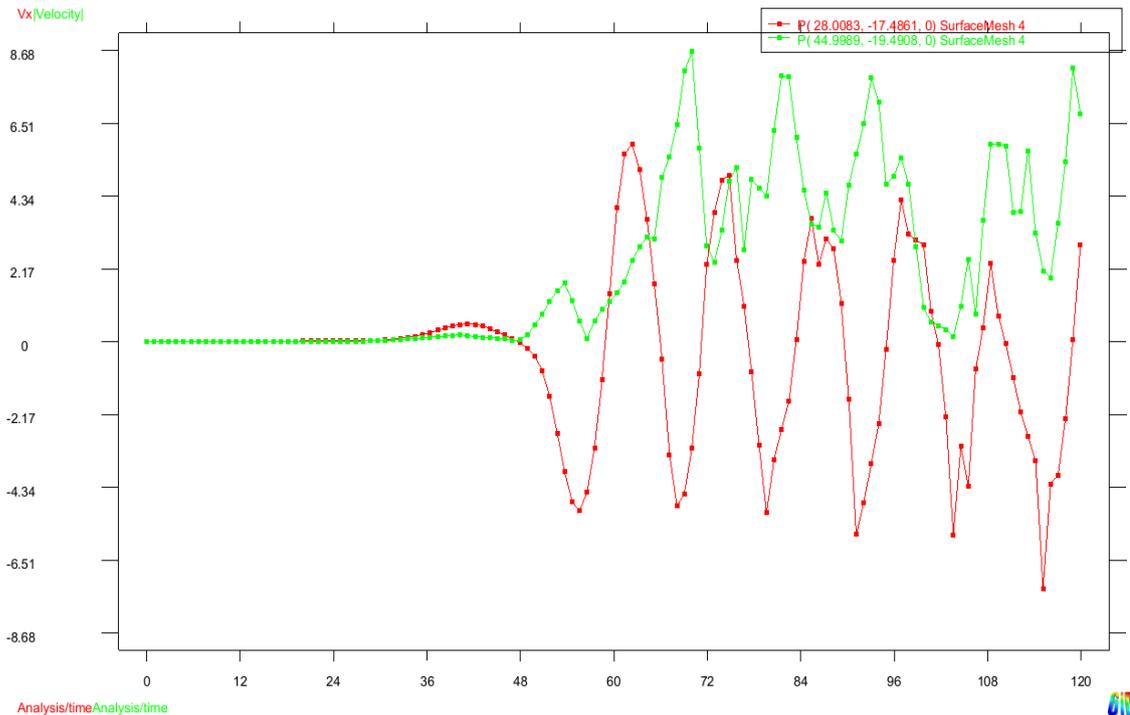


Fig. 4.4.3.7 Velocidades en el entorno del dique con fuerza al 75%

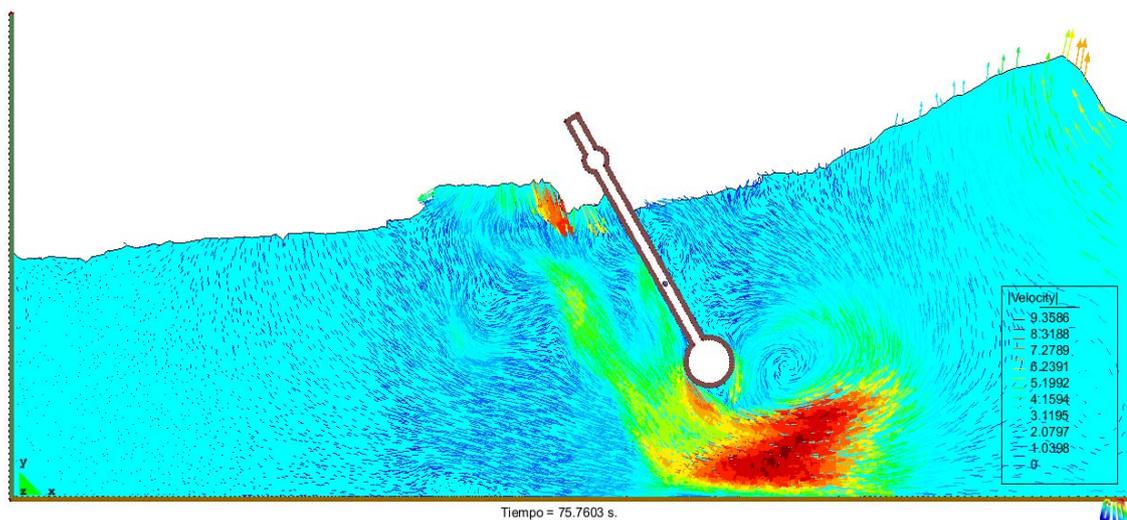


Fig. 4.4.3.5 Aplicación de una fuerza al 50%

#### 4.4.4.- Ensayos con zona disipativa.

En la siguiente alternativa se propone introducir una zona viscosa que absorba parte de la energía de las corrientes de fondo, tal como si existiera un sistema de turbinas de fondo que actuaran como mecanismo de extracción de energía.

El siguiente grafico muestra los resultados obtenidos con diferentes valores de viscosidad en la zona disipativa.

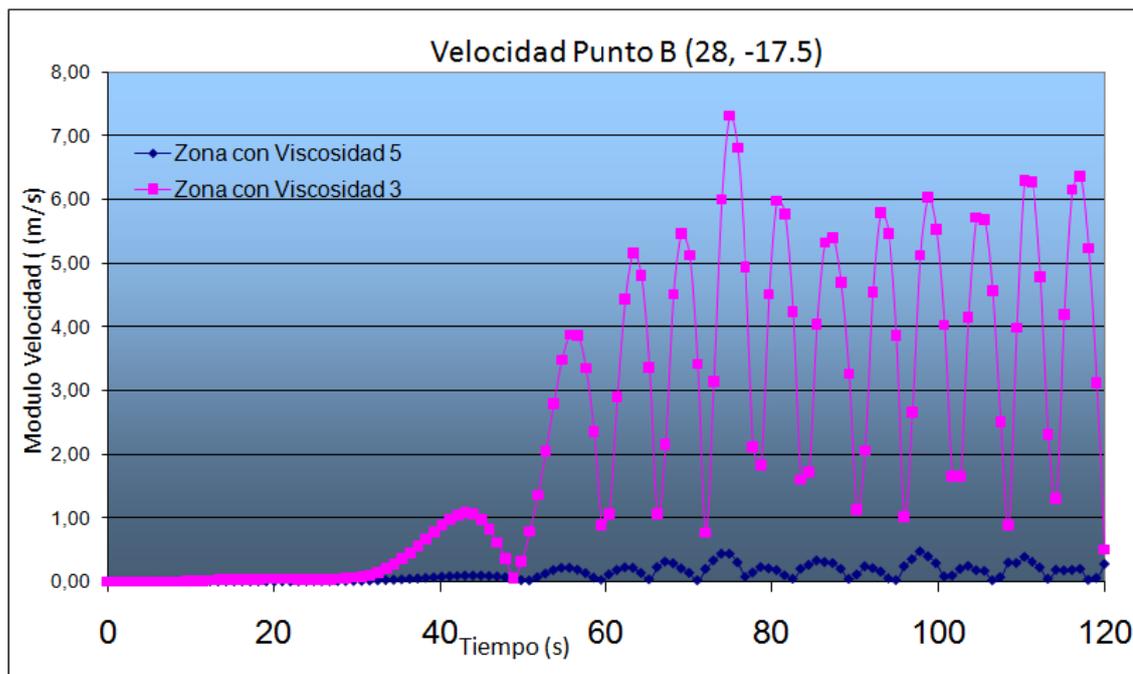


Fig. 4.4.4.1 Aplicación de una zona disipativa

Puede observarse claramente que el caso con viscosidad  $10^5$  absorbe la energía en casi en su totalidad

Al comparar los resultados de los ensayos con fuerza con los obtenidos al usar una viscosidad  $10^3$  se observa una mejora importante en las velocidades generadas, tal y como indicaban los registros de superficie libre mostrados anteriormente.

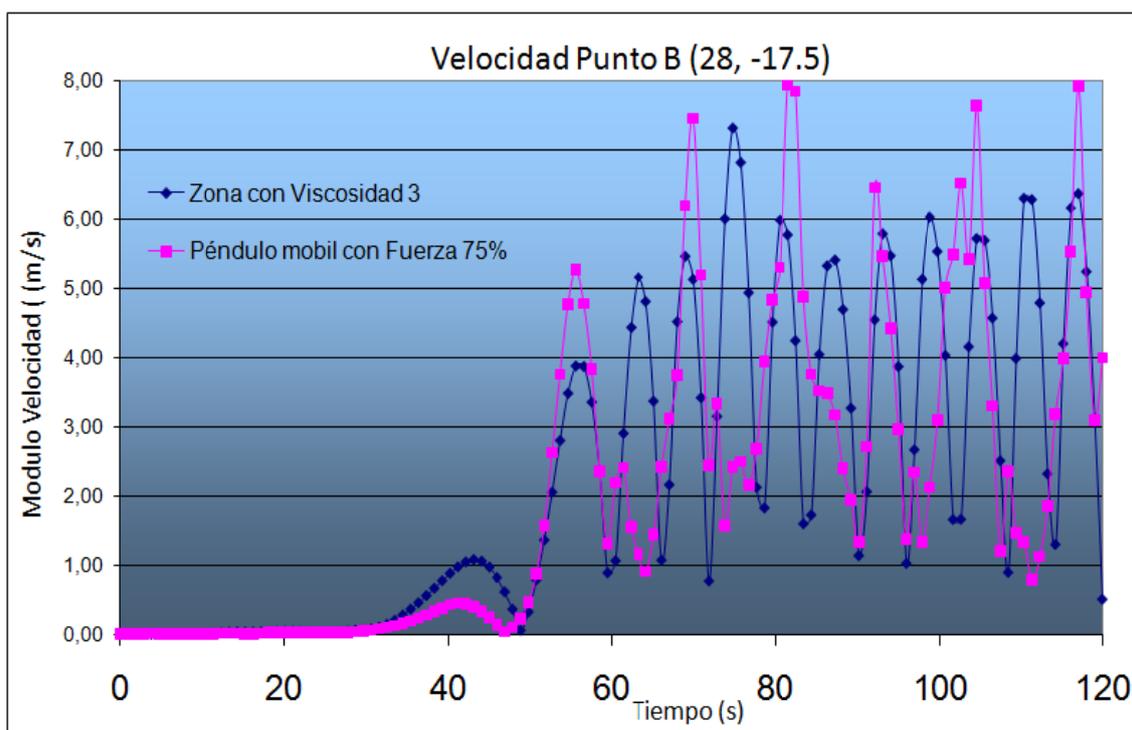


Fig. 4.4.4.2 Aplicación de una zona disipativa

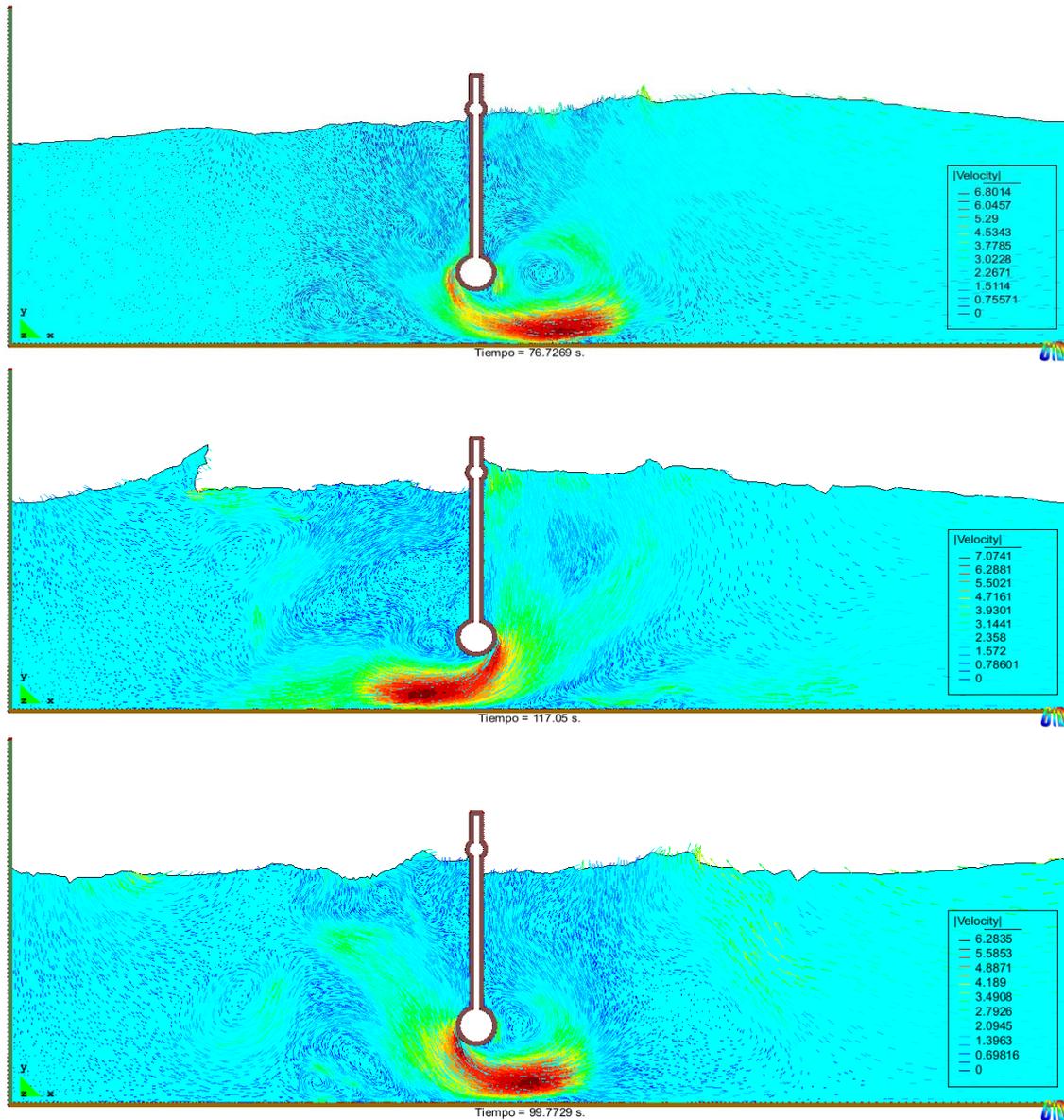


Fig. 4.4.4.3 Fotogramas al aplicar una zona disipativa

Al definir una viscosidad excesiva puede comprobarse que se bloquea totalmente la corriente bajo péndulo (figura 4.4.4.4)

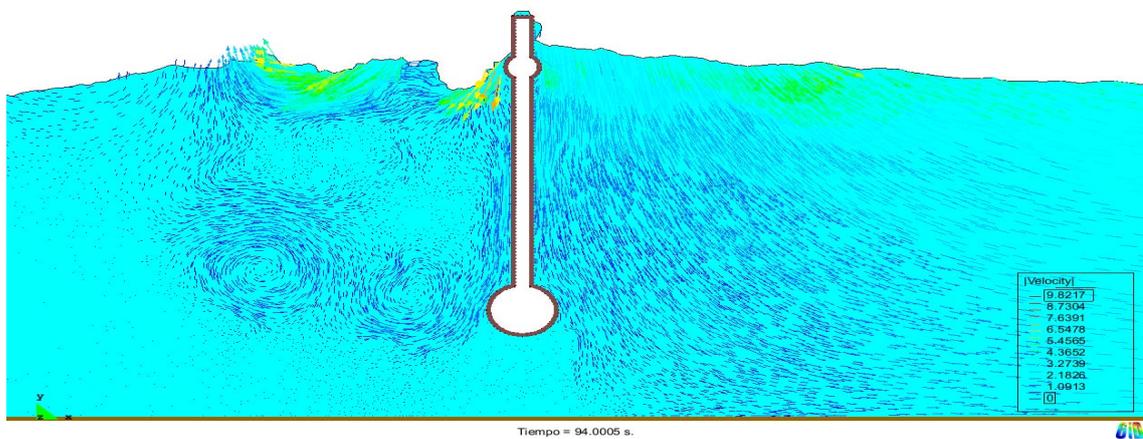
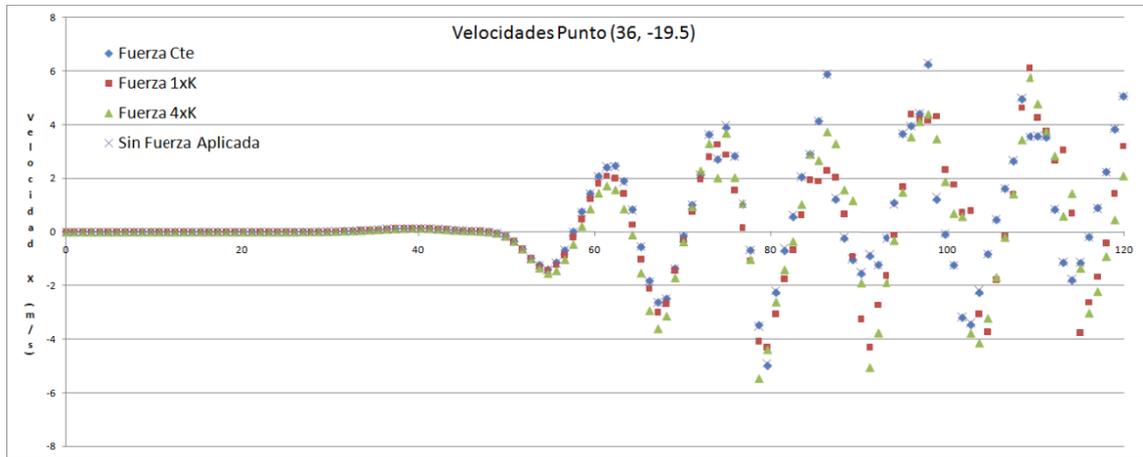


Fig. 4.4.4.4 Bloqueo en la zona disipativa

#### 4.4.5.- Ensayos con dique inverso.

Los resultados obtenidos con la propuesta de usar un dique inverso no parecen, en principio, mostrar variaciones significativas en los casos simulados inicialmente.

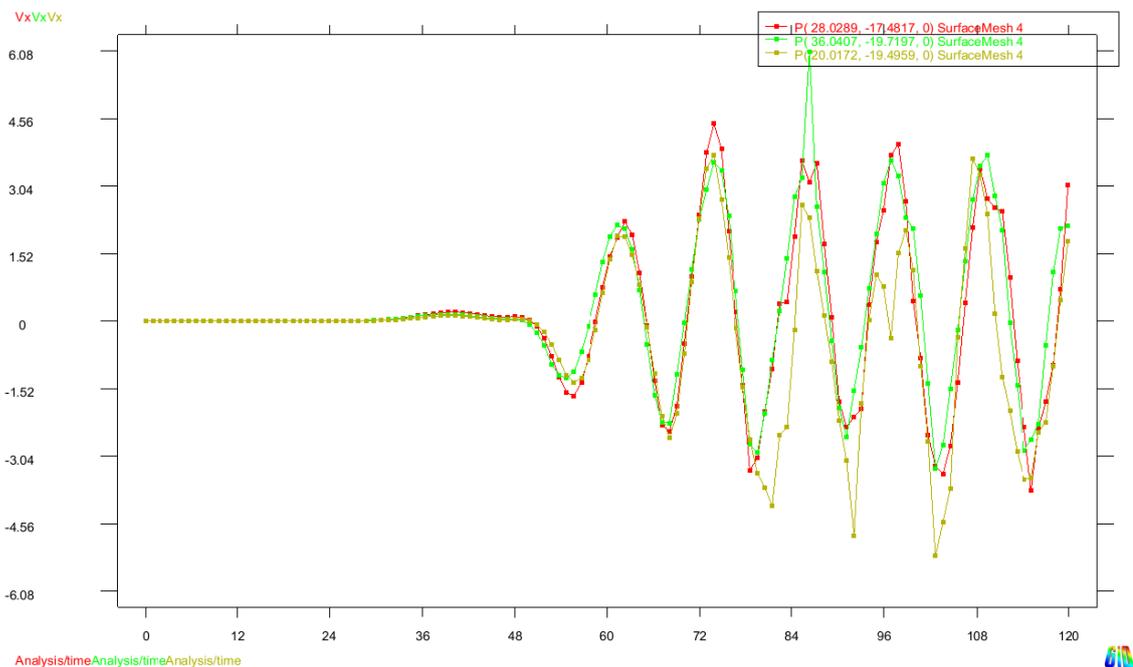
El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos con diferentes valores de fuerza, variando la constante K o el término fijo.



**Fig. 4.4.5.1** Velocidades en B - dique inverso

Una vez corregido el error en el código del módulo de cálculo se obtienen los resultados siguientes.

- Caso H6T12 - K = 38571



**Fig. 4.4.5.2** Velocidades en entorno del dique invertido

Se han registrado las velocidades en tres puntos cercanos a la base del péndulo, un registro en el punto B (28, -17.5) y otros dos puntos cercanos a la cota de fondo del canal (20, -19.5) y (36, -19.7) que dan una idea de la erosión que puede producirse en el fondo.

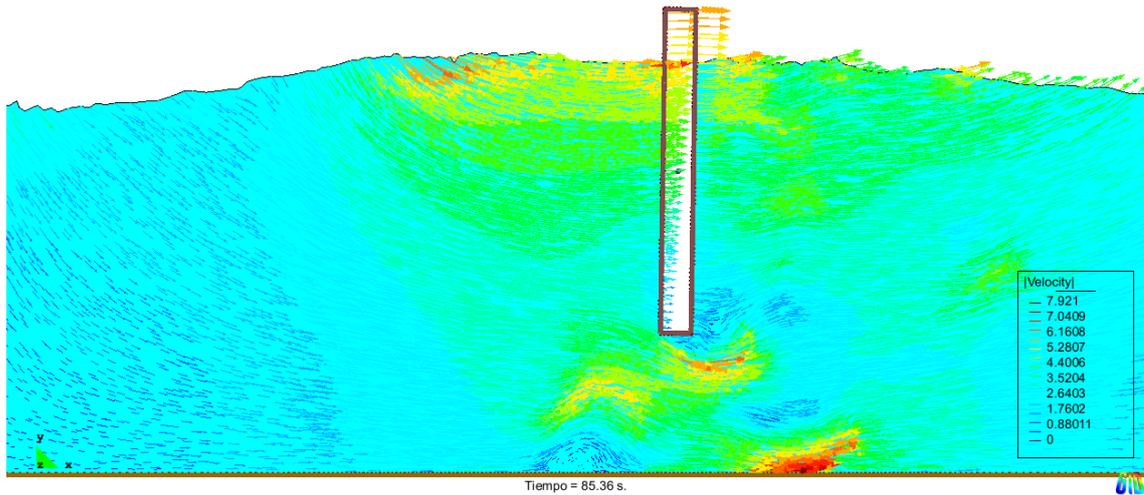


Fig. 4.4.5.3 Campo de velocidades - dique inverso

- Caso H6T12 -  $K = 154284$

Al aumentar el valor de la constante  $K$  se puede observar claramente la variación de las tendencias que siguen las velocidades registradas en los dos puntos de fondo, siendo la velocidad de las corrientes de salida y de entrada de magnitud similar.

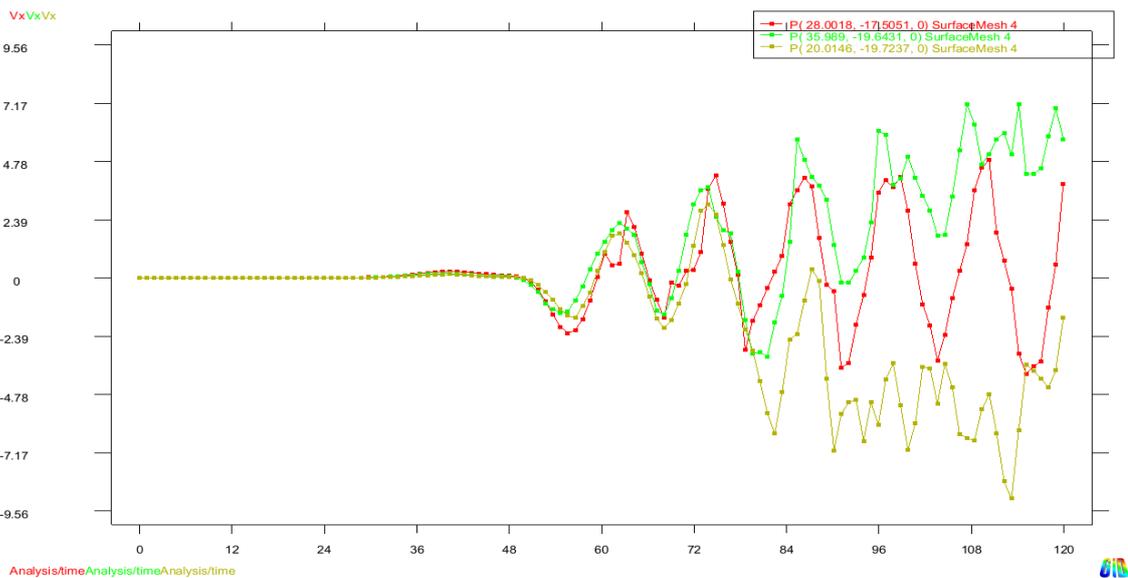


Fig. 4.4.5.4 Velocidades en B - dique inverso

Por otra parte la generación de vórtices en el trasdós es un fenómeno que se produce continuamente y que disipa una cantidad de energía importante.

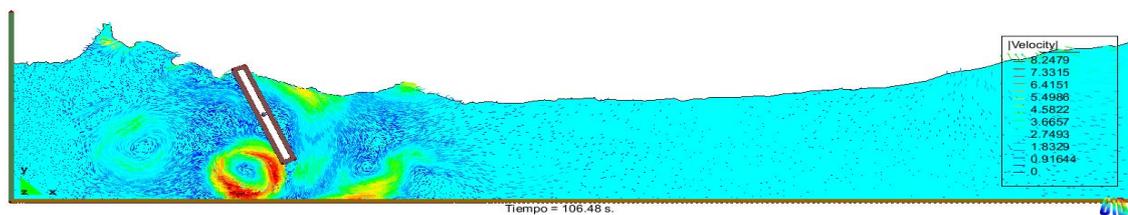


Fig. 4.4.5.5 Generación de vórtices

TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.

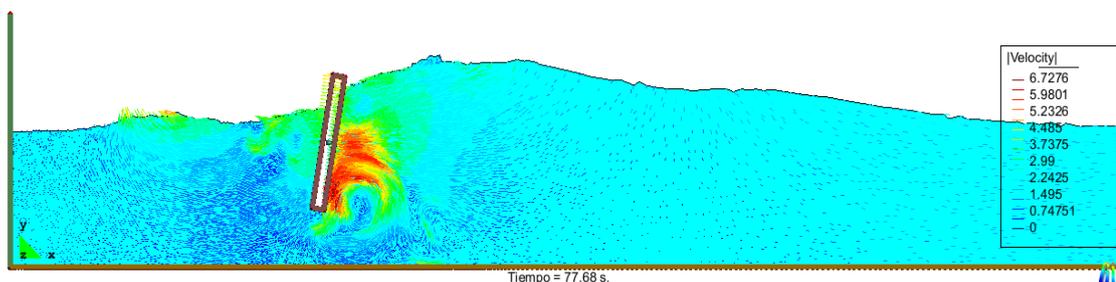


Fig. 4.4.5.6 Generación de vórtices

- Caso H6T12 - Sin fuerza aplicada

En el caso de no aplicar ninguna fuerza, las corrientes que se producen por debajo del dique son de menor intensidad, dado que este dispone de más movilidad.

El siguiente gráfico muestra el registro de velocidades obtenido en este ensayo:

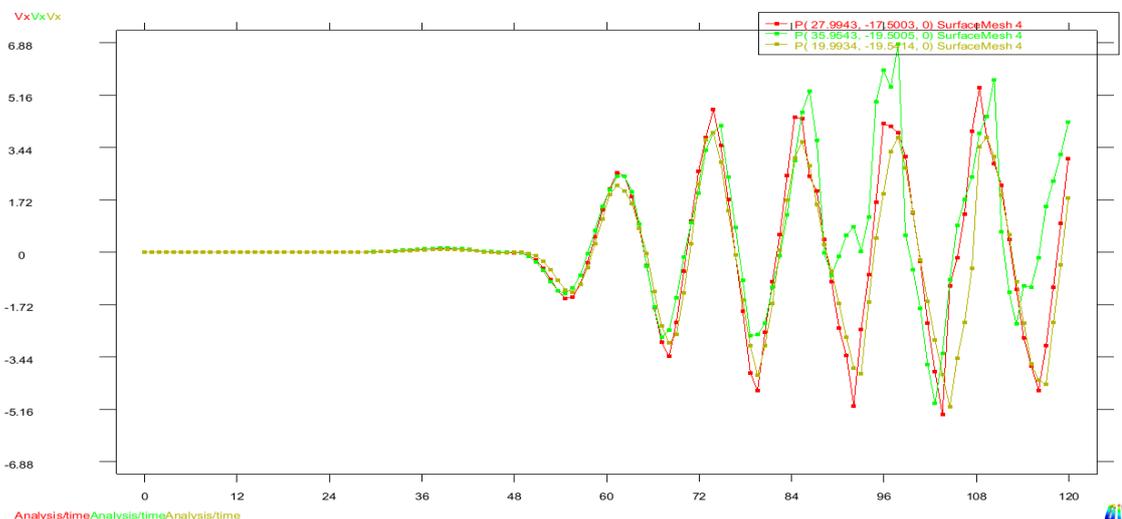


Fig. 4.4.5.7 Velocidades en B - dique inverso

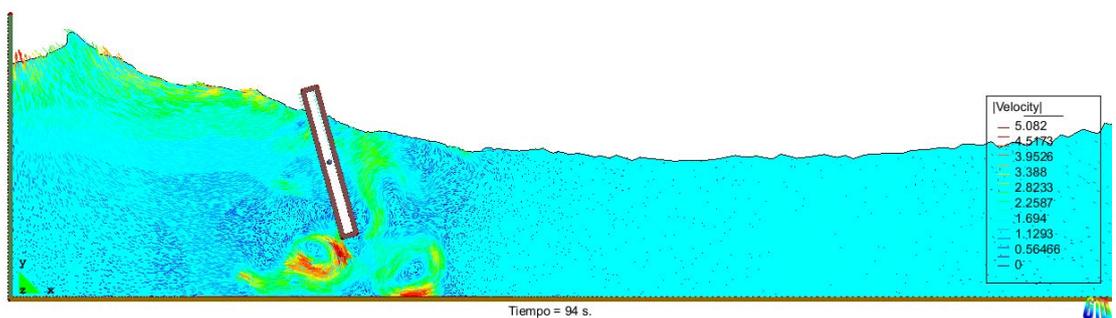


Fig. 4.4.5.8 Velocidades en B - dique inverso

En la imagen 4.4.5.8 puede observarse la continuidad en la línea de superficie libre a través de la geometría del dique que se ajusta al hecho de que no existe ninguna fuerza externa aplicada sobre el mismo.

- Caso H6T12 -  $K = 154284$  y centro de rotación del dique en cota -13 metros.

En este último ensayo se propone desplazar el centro de rotación del dique hacia una cota superior (28, -13) de forma que, en principio, el momento que actuaría sobre el mismo sería menor. Si se compara con ensayo anterior, con centro de rotación situado en el fondo, se puede observar que el registro de velocidades en las cotas de fondo oscila mucho más en este caso.

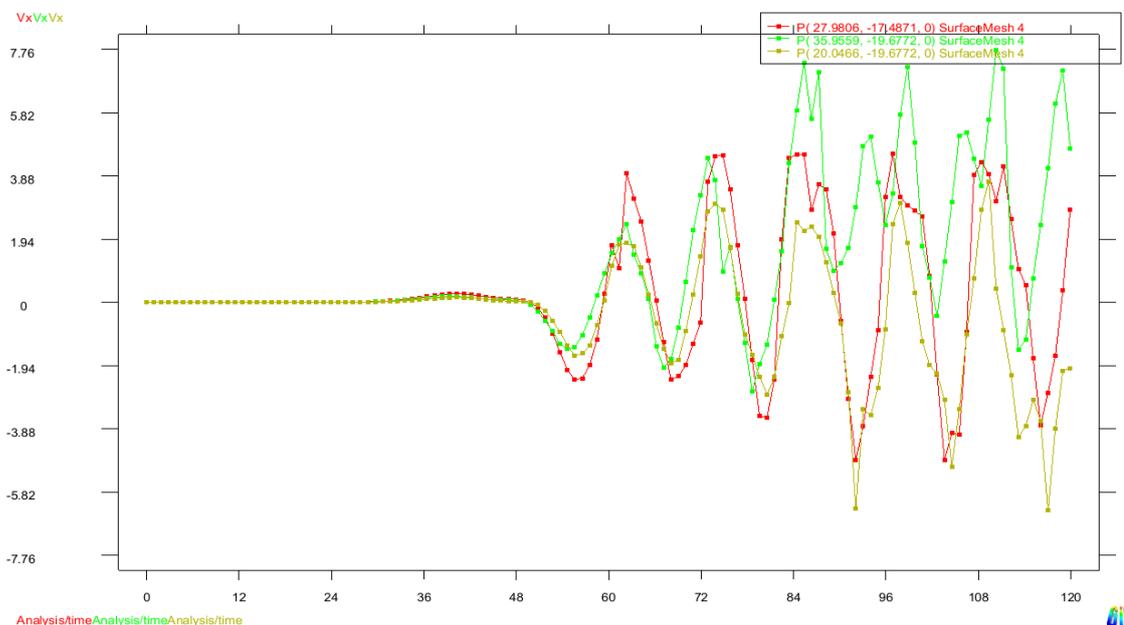


Fig. 4.4.5.9 Velocidades en B - dique inverso

Las imágenes 4.4.5.10 y 4.4.5.11 muestran la diferencia de cota existente en ambos lados del dique y confirman que existe una fuerza actuante en esos instantes que rompe la continuidad de la línea de superficie del agua.

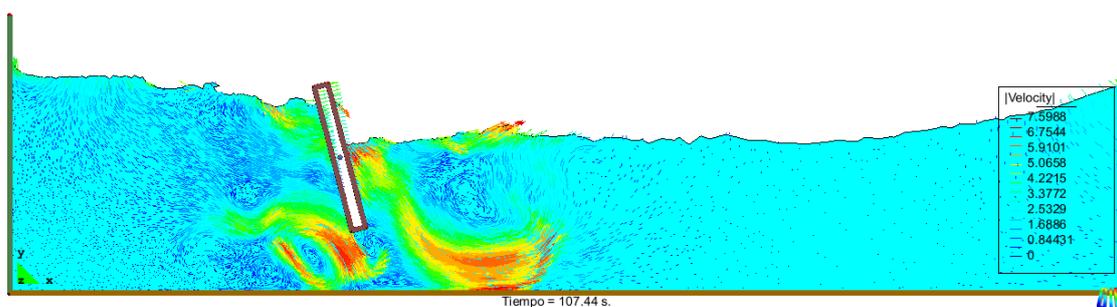


Fig. 4.4.5.10 Velocidades en B - dique inverso

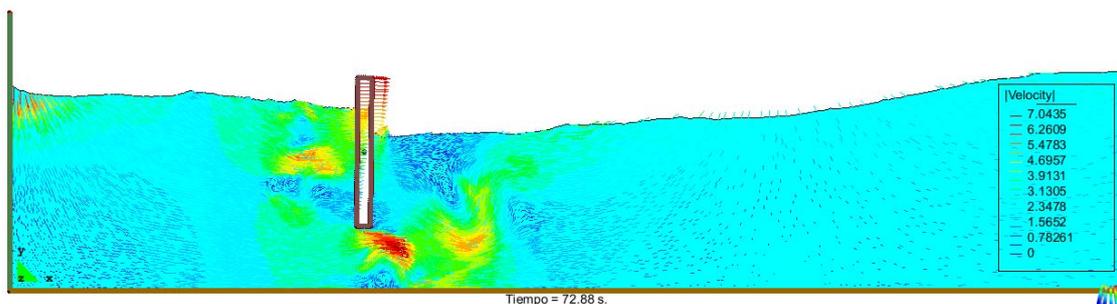


Fig. 4.4.5.11 Velocidades en B - dique inverso

## Capítulo 5.

### Conclusiones y estudios futuros

---

Con los resultados obtenidos a lo largo del estudio se puede concluir que existen dos geometrías concretas que convierten la estructura en viable, al menos, en esta fase del proyecto. Así, las geometrías que cualitativamente han dado mejor respuesta al oleaje simulado han sido:

- La estructura con dique pendular directo y zona disipativa en la base del mismo, simulando un sistema de extracción de energía del oleaje mediante turbinas, ha dado buenos resultados tal y como se expone en el capítulo 4.

Aún así, hay que tener en cuenta que en ese ensayo se ha supuesto que el movimiento del dique se encuentra bloqueado durante los periodos de funcionamiento de las turbinas, maximizando de esa forma las corrientes bajo dique y la extracción de energía.

- La estructura con el dique pendular inverso con fuerza aplicada variable proporcional a la velocidad del punto de aplicación minimiza las oscilaciones de la superficie del agua en el trasdós del dique. Además, y dada su geometría, el movimiento oscilante del dique se adapta mejor al movimiento del oleaje dado que su centro de rotación se sitúa lejos de la superficie libre del agua.

De cara a futuros estudios puede considerarse el análisis de un caso con la geometría de dique pendular inverso, aprovechando el desplazamiento del centro de rotación a una cota superior, con una zona disipativa en la zona comprendida entre ese nuevo centro de rotación y el fondo del canal.

Al mismo tiempo, la estructura con el sistema de turbinas simulado serviría de base de apoyo para el dique resolviendo de esta forma una de las incógnitas constructivas fundamentales.

En referente al módulo de cálculo *Pflow* utilizado en los ensayos realizados, puede decirse que proporciona unos resultados realmente precisos en todos los ensayos propuestos y su flexibilidad para adaptarse a nuevas condiciones de contorno lo hacen ideal para todo tipo de estudios relacionados con la interacción fluido-estructura.

Por otra parte, sería de interés llegar a corregir las distorsiones producidas por el oleaje reflejado en el generador de olas y que pueden llegar a invalidar los resultados a partir de un cierto instante.

En el artículo sobre diseño de filtros del anexo 2 se expone como diseñar un mecanismo de filtrado de oleaje reflejado en canales experimentales y que podría adaptarse para ser incluido en la versión del módulo de cálculo actual, resolviendo así los problemas de distorsión existentes sin necesidad de incrementar la longitud del canal de simulación y, por tanto, reduciendo el tiempo de cálculo necesario.

Además, y tal como se cita en la tesina realizada por Ramon Calderer [10], el PFEM utiliza una formulación de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes excesivamente disipativa, siendo la magnitud de la energía disipada, mayor a medida que se incrementa la longitud del canal de simulación, por tanto la posibilidad de reducir esa longitud mediante el filtrado de oleaje, mejoraría también los resultados que se obtendrían desde un punto de vista energético.

## Capítulo 6.

### Referencias

---

- [1] Oñate, E; Celigueta, M.A.; Idelsohn, S.R. *Modeling bed erosion in free surface flows by the Particle Finite Element Method*. 2006.
- [2] Oñate, E. *A stabilized finite element method for incompressible viscous flows using a finite increment calculus formulation*. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 182(1-2):355-281. 2000.
- [3] Oñate, E.; Garcia, J. *A finite element method for fluid-structure interaction with surface waves using a finite calculus formulation*. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 191:635-660. 2001.
- [4] Oñate, E.; Idelsohn, S.R.; Del Pin, F. *Lagrangian formulation for incompressible fluids using finite calculus and the finite element method*. *Numerical Methods for Scientific Computing Variational Problems and Applications*. Y Kuznetsov, P Neittanmaki, O Pironneau (Eds), CIMNE, Barcelona. 2003.
- [5] Idelsohn S.R.; Oñate, E.; Calvo, N.; Del Pin F. *The meshless finite element method*. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 58(6):893-912. 2003.
- [6] Idelsohn, S.R.; Oñate, E; Del Pin, F. *A lagrangian meshless finite element method applied to fluid-structure interaction problems*. *Computer and Structures*. 81:655-671. 2003.
- [7] Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier. 2005.
- [8] Oñate, E. *Derivation of stabilized equations for advective-diffusive transport and fluid flow problems*. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 151:233-267. 1998.
- [9] Idelsohn, S.R.; Oñate, E.; Del Pin, F.; Calvo, N. *Lagrangian formulation: the only way to solve some free-surface fluid mechanics problems*. *Fifht World Congress on Computational Mechanics*, Mang HA, Rammerstorfer FG, Eberhardsteiner J (eds), July 7-12, Viena, Austria. 2002.
- [10] Calderer, R. *Aplicació del PFEM al problema de transport de sediment*. ETSECCPB. TFC. 2008.
- [11] Dalrymple, R.A.; Dean R.G.. *The spiral wavemaker for littoral drift studies*. *Proc. 13th Conference Coastal Eng. ASCE*. 1972.
- [12] Galvin, C.J. *Wave-Height prediction for wave generators in shallow water*. *Tech. Memo 4. U.S. Army. Coastal Engineering Research Center*. 1964
- [13] Sommerfeld, A. *Mechanics of deformable bodies*. Vol 2 of *Lectures on Theoretical Physics*. Academic press. New York. 1964.

*TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.*

#### SOFTWARE UTILIZADO

[P1] *GiD. The personal pre/postprocessor.* [www.gidhome.com](http://www.gidhome.com). CIMNE, Barcelona. 2006.

[P2] *Pflow (fSUITE).* CIMNE, Barcelona.

## Capítulo 7.

### Agradecimientos

---

Siempre he pensado que los agradecimientos deben ir dedicados a aquellos a los que realmente tienes algo que agradecer, así que ante todo quiero agradecer a Miguel Ángel Celigueta toda la ayuda prestada durante el transcurso de esta tesina, a Juan Miquel Canet por la paciencia que tiene con sus tesinantes y a Eugenio Oñate por ofrecerme la posibilidad de realizar mi TFC en el Cimne.

Además, y no por ello menos importante, agradecer todo el apoyo de mis amigos y mi familia, que siempre están ahí cuando se les necesita.

*TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.*

## Capítulo 8.

### Anejos

---

#### ANEJO 1. Generación de oleaje

Con la intención de generar olas muy específicas, existen distintos tipos de generadores de olas, entre ellos los de pistón, los tipo “flap”, los de tipo cuña y los cilíndricos.

El movimiento se rige por

$$\omega(t) = \Omega \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

siendo su velocidad angular máxima ( $\Omega$ ).

Por otro lado, en generación de olas mediante *pistón* se acepta, por conservación de volúmenes, que

$$\left(\frac{H}{S}\right) = kh$$

donde H es la altura de ola, k es el número de onda, h es la profundidad y S es la carrera o recorrido.

Como  $k = \frac{2\pi}{L}$ , tenemos que  $H = \frac{S\pi h}{L}$ . Sin embargo, la carrera (S) en el caso del pistón se puede escribir en función de  $\Omega$  y T tal que,

$$S = \frac{\Omega T}{\pi}$$

Entonces la altura de ola sigue la siguiente expresión:

$$H = \frac{2\pi h S}{L}$$

Donde L debe ser hallada encontrando el cero de la función

$$y = L - \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right). \text{ Ya que } L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right).$$

Así pues, mediante una estrategia iterativa, a partir de ternas  $\{\Omega, T, h\}$  podemos generar las olas cuyas características más nos interesen.

TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.

%%Directamente encuentra el valor de wmax que queremos para el PFEM cuando  
%%ponemos un pistón generador de olas  
%%Se requieren la función NewtonL para encontrar el valor de L por iteraciones

```
T=input('T? --> ');  
H=input('H? --> ');  
h=input('h? --> ');
```

```
w0=0.1;  
w=w0;  
r=1;
```

```
while (r>0.0000001)
```

```
S=w*T/pi;  
L=NewtonL(T,h);  
H1=S*2*pi*h/L;  
factor=H/H1;  
w=factor*w;  
r=abs((H-H1)/H);
```

```
end  
c=L/T;  
S  
c  
L  
T  
H1  
w
```

%%Coded by Miguel Angel Celigueta

```
function [L]=NewtonL(T,h)
```

```
g=9.81;  
L=g*(T^2)/(2*pi);  
r=1;
```

```
while (r>0.000001)  
y=L-g*T^2/(2*pi)*tanh(2*pi*h/L);  
y1= 1+g*T^2*h/(L^2)*(1-(tanh(2*pi*h/L))^2);  
L1=L-y/y1;  
r=abs(L1-L);  
L=L1;  
end
```

```
L;
```

## ANEJO 2 - A TIME DOMAIN METHOD FOR SEPARATING INCIDENT AND REFLECTED IRREGULAR WAVES

by P. Frigaard and M. Brorsen

Department of Civil Engineering, Aalborg University

### 1.- Introduction

In the hydraulic laboratory environment a separation of an irregular wave field into incident waves propagating towards a structure, and reflected waves propagating away from the structure is often wanted. This is due to the fact that response of the structure to the incident waves is target of the model test.

Goda and Suzuki (1976) presented a frequency domain method for estimation of irregular incident and reflected waves in random waves. Mansard and Funke (1980) improved this method using a least squares technique.

In the following a time-domain method for Separating the Incident waves and the Reflected Waves is presented. The method is based on the use of digital filters and can separate the wave fields in real time.

### 2.- Principle

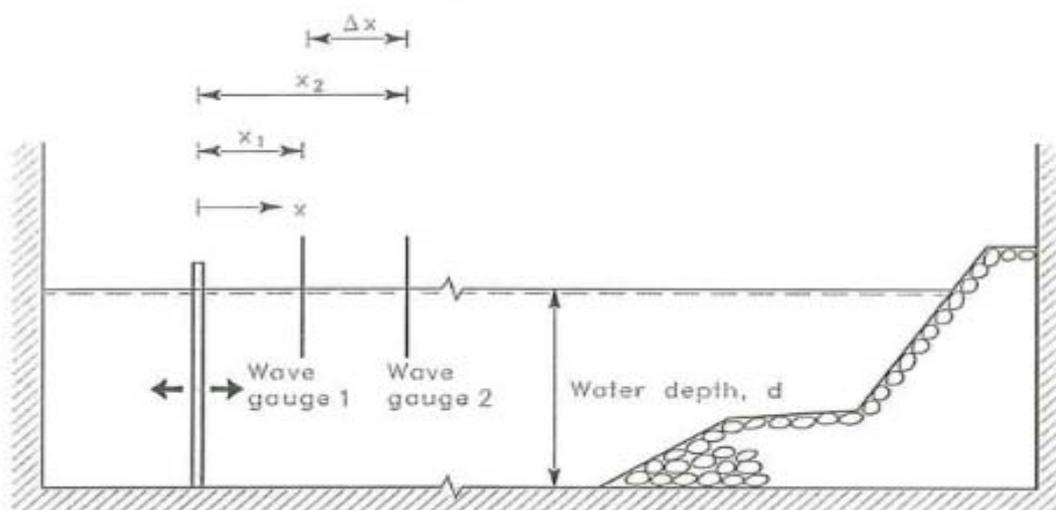


Figure 1: Wave channel with piston-type wave generator

To illustrate the principle of the SIRW-method the set-up shown in fig.1 will be considered. The surface elevation  $n(x,t)$  at distance  $x$  from the wave generator may be written as the sum of the incident and reflected waves: wave propagating away from the wave generator, and the reflected wave propagating towards the wave generator.

Even though the method works for irregular waves it will be demonstrated in the following pages for the case of monochromatic waves.

$$\begin{aligned}\eta(x, t) &= \eta_I(x, t) + \eta_R(x, t) \\ &= a_I \cos(2\pi ft - kx + \phi_I) + a_R \cos(2\pi ft + kx + \phi_R)\end{aligned}\quad (1)$$

where

$$\begin{aligned}f &: \text{frequency} \\ a = a(f) &: \text{wave amplitude} \\ k = k(f) &: \text{wave number} \\ \phi = \phi(f) &: \text{phase}\end{aligned}$$

and indices I and R denote incident and reflected , respectively.

At the two gauges we have:

$$\begin{aligned}\eta(x_1, t) &= a_I \cos(2\pi ft - kx_1 + \phi_I) + a_R \cos(2\pi ft + kx_1 + \phi_R) \\ \eta(x_2, t) &= a_I \cos(2\pi ft - kx_2 + \phi_I) + a_R \cos(2\pi ft + kx_2 + \phi_R) \\ &= a_I \cos(2\pi ft - kx_1 - k\Delta x + \phi_I) + \\ &\quad a_R \cos(2\pi ft + kx_1 + k\Delta x + \phi_R)\end{aligned}\quad (2)$$

where  $x_2 = x_1 + \Delta x$  has been substituted into eq. (3)

It is seen that the incident wave is phaseshifted  $\Delta\phi = -k\Delta x$  from signal  $\eta(x_1, t)$  to signal  $\eta(x_2, t)$ , and the reflected wave is phaseshifted  $\Delta\phi = -k\Delta x$  due to opposite travel directions. These phaseshifts are called the physical phaseshifts and are denoted  $\phi^{phys}$  for both incident and reflected waves.

The idea in the following manipulations of the elevation signals is to phaseshift the signals from the two gauges in such ways that the incident parts of the wave signals are in phase while the reflected parts of the signals are in mutual opposite phase. In this case the sum of the two manipulated signals is proportional to and in phase with the incident wave signal.

An amplification C and theoretical phase shift  $\phi^{theo}$  are introduced into the expressions for  $\eta(x, t)$ . The modified signal is denoted  $\eta^*$ . For the i'th wave gauge signal the modified signal is defined as:

$$\begin{aligned}\eta^*(x_i, t) &= Ca_I \cos(2\pi ft - kx_i + \phi_I + \phi_i^{theo}) + \\ &\quad Ca_R \cos(2\pi ft + kx_i + \phi_R + \phi_i^{theo})\end{aligned}\quad (4)$$

This gives at wave gauges 1 and 2:

$$\begin{aligned}\eta^*(x_1, t) &= Ca_I \cos(2\pi ft - kx_1 + \phi_I + \phi_1^{theo}) + \\ &\quad Ca_R \cos(2\pi ft + kx_1 + \phi_R + \phi_1^{theo})\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\eta^*(x_2, t) &= Ca_I \cos(2\pi ft - kx_2 + \phi_I + \phi_2^{theo}) + \\ &\quad Ca_R \cos(2\pi ft + kx_2 + \phi_R + \phi_2^{theo}) \\ &= Ca_I \cos(2\pi ft - kx_1 - k\Delta x + \phi_I + \phi_2^{theo}) + \\ &\quad Ca_R \cos(2\pi ft + kx_1 + k\Delta x + \phi_R + \phi_2^{theo})\end{aligned}\quad (6)$$

The sum of  $\eta^*(x_1, t) + \eta^*(x_2, t)$ , which is denoted  $\eta^{calc}(t)$ , gives:

$$\begin{aligned}
 \eta^{calc}(t) &= \eta^*(x_1, t) + \eta^*(x_2, t) \\
 &= C a_I \cos(2\pi f t - k x_1 + \phi_I + \phi_1^{theo}) + \\
 &\quad C a_R \cos(2\pi f t + k x_1 + \phi_R + \phi_1^{theo}) + \\
 &\quad C a_I \cos(2\pi f t - k x_1 - k \Delta x + \phi_I + \phi_2^{theo}) + \\
 &\quad C a_R \cos(2\pi f t + k x_1 + k \Delta x + \phi_R + \phi_2^{theo}) \\
 &= 2C a_I \cos(0.5(-k \Delta x - \phi_1^{theo} + \phi_2^{theo})) \\
 &\quad \cos(2\pi f t - k x_1 + \phi_I + 0.5(-k \Delta x + \phi_1^{theo} + \phi_2^{theo})) + \\
 &\quad 2C a_R \cos(0.5(-k \Delta x + \phi_1^{theo} - \phi_2^{theo})) \\
 &\quad \cos(2\pi f t + k x_1 + \phi_R + 0.5(k \Delta x + \phi_1^{theo} + \phi_2^{theo})) \tag{7}
 \end{aligned}$$

It is seen that  $\eta^{calc}(t)$  and  $\eta_i(x_i, t) = a_i \cos(2\pi f t - k x_i + \phi_i)$  are identical signals when the following three conditions are met:

$$\begin{aligned}
 2C \cos(0.5(-k \Delta x - \phi_1^{theo} + \phi_2^{theo})) &= 1 \\
 0.5(-k \Delta x + \phi_1^{theo} + \phi_2^{theo}) &= n \cdot 2\pi \quad n \in (0, \pm 1, \pm 2, \dots) \\
 0.5(-k \Delta x + \phi_1^{theo} - \phi_2^{theo}) &= \frac{\pi}{2} + m \cdot \pi \quad m \in (0, \pm 1, \pm 2, \dots) \tag{8}, (9), (10)
 \end{aligned}$$

Solving eq (8) - eq (10) with respect to theoretical  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  and C gives eq (11) - eq (13)

$n$  and  $m$  can still be chosen arbitrarily.

$$\begin{aligned}
 \phi_1^{theo} &= k \Delta x + \pi/2 + m\pi + n2\pi \\
 \phi_2^{theo} &= -\pi/2 - m\pi + n2\pi \\
 C &= \frac{1}{2\cos(-k \Delta x - \pi/2 - m\pi)} \tag{11), (12), (13)
 \end{aligned}$$

All the previous considerations and calculations were done in order to find an amplification and phaseshift for each of the two elevation signals  $\eta_1$  and  $\eta_2$ .

Eq (11) - eq (13) give the result of our efforts, i.e  $\eta^{calc}(t) = \eta_i(x_i, t)$ . Remembering that  $\phi_i^{theo} = \phi_i^{theo}(f)$  for both  $\phi_1$  and  $\phi_2$  and  $C = C(f)$ , it is seen that the goal is already reached in the *frequency domain*. However, the implementation of the principle will be done in the *time domain* digital filters.

It is seen that singularities may occur. The consequences and the handling of the singularities will be treated later on in the paper. Here it should just be mentioned that on way to bypass the singularities is to use a velocity meter instead of one of the two

wave gauges. Nevertheless, this paper will concentrate on using elevation signals from two wave gauges.

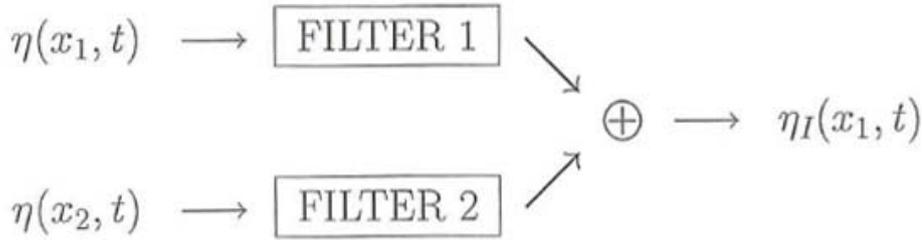


Figure 2: Flow diagram for signals in the SIRW-method

The purposes of the filters shown in Fig.2 are exactly a frequency dependent amplification and a frequency dependent phaseshift on each of the two elevation signals.

Taking  $n = 0$  and  $m = 0$  the frequency response functions  $H_1(f)$  for filter 1 and  $H_2(f)$  for filter 2 calculated due eq (11) - eq (13) are given below in complex notation

$$\begin{aligned} Re\{H_1(f)\} &= \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \cdot \cos(k\Delta x + \pi/2) \\ Im\{H_1(f)\} &= \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \cdot \sin(k\Delta x + \pi/2) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Re\{H_2(f)\} &= \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \cdot \cos(-\pi/2) \\ Im\{H_2(f)\} &= \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \cdot \sin(-\pi/2) \end{aligned} \quad (15)$$

Based on eq (14) and eq (15) it is straightforward to design the time domain filters.

### ANEJO 3 - WAVEMAKER THEORY

#### 6.1 INTRODUCTION

To date most laboratory testing of floating or bottom-mounted and studies of beach profiles and other related phenomena have utilized wave tanks, which are usually characterized as long, narrow enclosures with a wavemaker of some kind at one end; however, circular beaches have been proposed for littoral drift studies and a spiral wavemaker has been used (Dalrymple and Dean [11]). For all of these tests, the wavemaker is very important. The wave motion that induces and its power requirements can be determinate reasonably well from linear wave theory.

Wavemakers are, in fact, more ubiquitous than one would expect. Earthquake excitation of the seafloor or human-made structures causes waves which can be estimated by wavemaker theory; in fact, the loading on the structures can be determinate (see Chapter 8). Any moving body in a fluid with a free surface will produce waves; ducks, boats, and so on.

#### 6.2 SIMPLIFIED THEORY FOR PLANE WAVEMAKERS IN SHALLOW WATER

In shallow water, a simple theory for generation of waves by wavemakers was proposed by Galvin [12], who reasoned that the water displaced by the wavemaker should be equal to the crest volume of the propagating wave form. For example, consider a piston wavemaker with a stroke  $S$  which constant over a depth  $h$ . the volume of water displaced over a whole stroke is  $Sh$  (see figure 6.1). The volume of water in a wave crest is  $\int_0^{L/2} \left(\frac{H}{2}\right) \sin kx \, dx = \frac{H}{k}$ . equating the two volumes,

$$Sh = \frac{H}{k} = \frac{H}{2} \frac{L}{2} \frac{2}{\pi}$$

In which the  $2/\pi$  factor represents the ratio of the shaded area to the area of the enclosing rectangle (i.c., an area factor). This equation can also be expressed

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{\text{piston}} = kh \tag{6.1}$$

Where  $H/S$  is the height-to-stroke ratio. This relationship is valid in shallow water region,  $kh < \pi/10$ . For a flap wavemaker, hinged at the bottom, the volume of water displaced by wavemaker would be less by a factor of 2.

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{\text{Flap}} = \frac{kh}{2} \tag{6.2}$$

These two relationships are shown as the straight dashed lines in Figure 6.2.

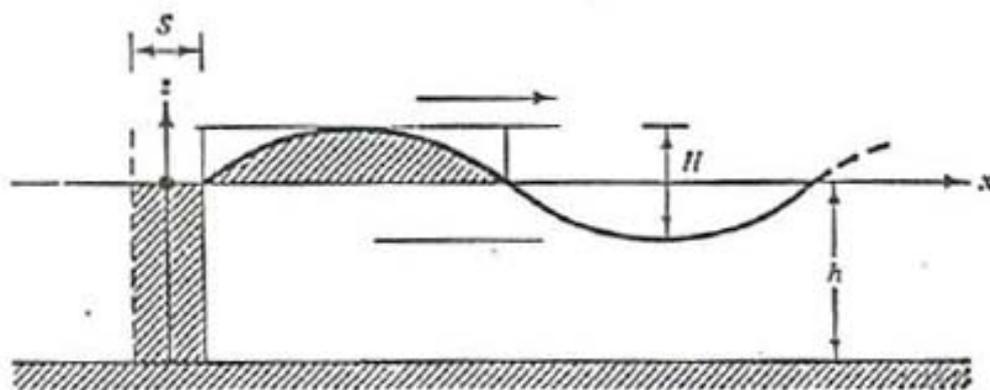


Figure 6.1 Simplified shallow water piston-type wavemaker theory of Galvin

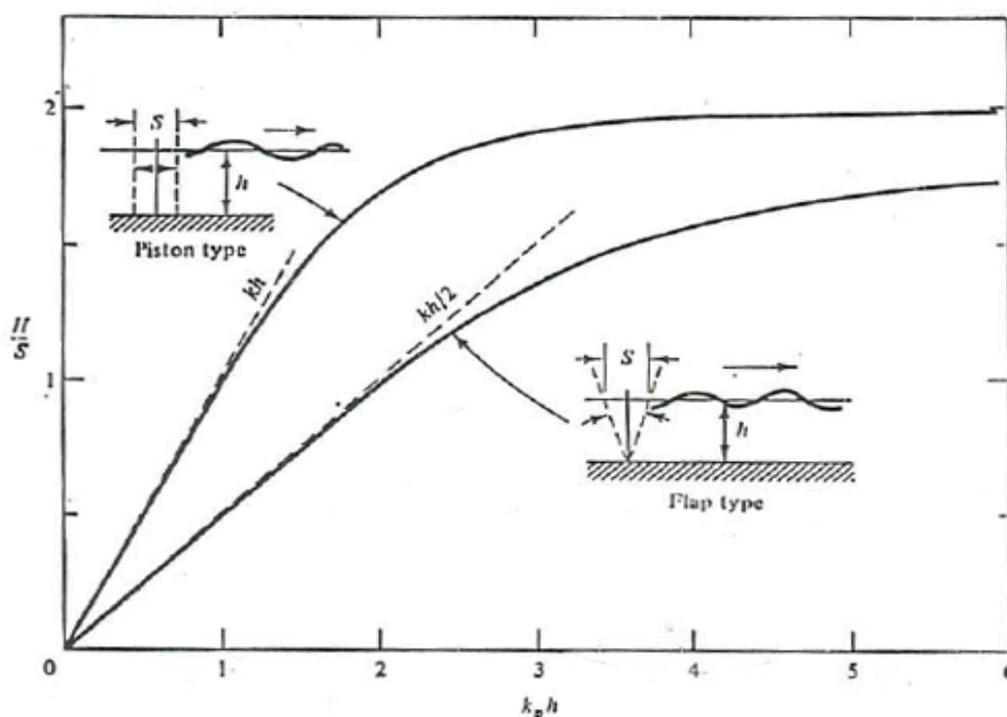


Figure 6.2 Plane wavemaker theory. Wave height to stroke ratios versus relative depths. Piston and flap wavemaker motions

Another type of wavemaker is the plunger wavemaker. This could be, as an example, a horizontal cylinder moving vertically about the mean water level. If the cylinder has a radius  $R$  and a stroke  $R$ , then the cylinder position ranges from fully emerged to half submerged at full stroke. If waves are generated in each direction normal to the cylinder axis, then for shallow water conditions the wave height-to-stroke ratio can be easily shown to be:

$$\frac{H}{R} = \frac{\pi(KR)}{4} \tag{6.3}$$

*TFC: Estudio numérico de un dique de láminas pendulares para amortiguación del oleaje y extracción de energía.*