

Estudio del impacto del oleaje sobre diques de bloques en puertos utilizando el método de elementos finitos y partículas (PFEM)

Estudio del impacto del oleaje sobre diques de bloques en puertos utilizando el método de elementos finitos y partículas (PFEM)

Autor: J. Salvador Latorre Sánchez

Tutores: Eugenio Oñate Ibáñez De Navarra y Benjamín Suárez Arroyo

RESUMEN

En la actualidad, las obras de ingeniería portuaria pueden presentar una gran complejidad a la hora de ser ejecutadas, ya que la posibilidad del desarrollo de los trabajos en obra depende de múltiples factores, el más importante de todos, la situación meteorológica en cada momento o, dicho de otra forma, el estado de mar. Ello requiere el desarrollo de detallados y cuidadosos estudios previos que ayuden a decidir, entre otras cosas, si es posible continuar con los trabajos para un determinado oleaje.

Esta tesina trata de analizar algunos de los problemas más habituales que se presentan a la hora de construir de un puerto de grandes dimensiones. Se estudiará el proceso de la construcción de un puerto y se desarrollarán aplicaciones que permitan evaluar, para cada una de sus fases, los riesgos o problemas asociados y las posibles soluciones a los mismos. Para ello, se mejorará y desarrollará el paquete de software PFLOW, una excelente y potente herramienta computacional para estudio del comportamiento del agua y la interacción entre fluido y estructura.

En esta tesina se presenta la aplicación práctica de las últimas mejoras realizadas al programa PFLOW para la creación de distintas aplicaciones informáticas para la resolución de diversos problemas dentro del campo de la ingeniería marítima. El trabajo incluye los desarrollos llevados a cabo, la validación a la que fue sometido el programa y las diversas aplicaciones del método de los elementos finitos y partículas para el caso de la interacción entre fluido y estructura.

El cuerpo de esta tesina empieza con una introducción al Método de los Elementos Finitos y Partículas (PFEM), que es la base teórica en el que está basado el paquete de software PFLOW. Se detallan los nuevos desarrollos del PFEM y su calibración y validación mediante ensayos experimentales sobre movimiento de corrientes de agua y el efecto de las mismas sobre objetos móviles.

Se detallará un procedimiento totalmente nuevo mediante el cual es posible la generación de cualquier geometría de dique formado por un número arbitrario de bloques de hormigón. Esta geometría será luego objeto de los pertinentes estudios utilizando el software PFLOW.

Se creará un nuevo procedimiento para estudiar la estabilidad de un dique bajo la acción de las olas tanto en etapas constructivas como finalizadas, incluyendo la posibilidad del arrastre de bloques sobre el manto bajo la acción de las olas. El dique podrá estar sometido a cualquier tipo de oleaje, tanto perpendicular como oblicuo, y se valorará el efecto del remonte, del rebase y, en especial, del flujo de las masas de agua de resaca sobre la estabilidad del mismo.

Se desarrolla una metodología para valorar los efectos del rebase sobre los elementos y equipos de obra situados sobre un dique y sus inmediaciones. Se aplicará el PFEM para determinar el efecto del mar sobre una maniobra de fondeo de un cajón, incluyendo la predicción de los movimientos del cajón y los esfuerzos sobre los cabrestantes. Finalmente, se definirá una metodología para estimar el oleaje crítico que produce la rotura de los cabestrantes en cada situación de fondeo.

ABSTRACT

Nowadays, the harbour engineering building works can be of a high complexity when executed because the possibility of work heavily depends on several factors, the most important of them is the weather at any time or, in other words, the sea state. That calls for the development of detailed and thorough previous studies to help us to decide, amongst other things, if it is possible to resume the works for a given sea swell.

This thesis tries to analyze some of the most usual problems faced when building a big scale harbour. The process of building a harbour will be studied and applications will be developed regarding the evaluation, for each one of its phases, the associated risks and problems and the possible solutions to solve them. For this, new improvements and developments will be implemented to the PFLOW package, an excellent and powerful computational tool devoted to the study of water behaviour and FSI (fluid-structure interaction).

In this thesis a practical application of the latest improvements of the program PFLOW regarding the creation of several computing applications for the resolution of several maritime engineering problems will be presented. This work includes developments, validation and applications of the particle finite element method in the case of fluid-structure interaction.

The main body of this thesis starts with an introduction to the Particle Finite Element Method (PFEM), theoretical basis on which the PFLOW package is based. New developments in PFEM will be detailed as well as its calibration and validation through experimental tests regarding movement of water masses and the impact of currents on objects.

A completely new procedure will be detailed through which it is possible the generation of any dike geometry with an arbitrary number of concrete blocks. This geometry will be then the subject of the appropriate studies using the PFLOW software.

A new procedure will be created in order to study dike stability under the action of water waves both during the constructive phase and finished, including the possibility of blocks being dragged by the waves. This dike will be subject to any kind of sea swell, perpendicular or oblique, and the effect of the run up, the overtopping and, specially, the undertow on the dike stability will be assessed.

A methodology to study the effects of wave overtopping on building elements and equipment on dikes and its surroundings will be developed. The PFEM will be used to establish the effect of the sea on a caisson anchorage maneuver, including predictions of the displacement of the caissons' stresses in cables. Finally, a methodology will be defined regarding critical swell producing cable failure for every anchorage situation.

ÍNDICE

Resumen.....	4
Abstract.....	5
Agradecimientos.....	6
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 – Introducción.....	7
1.2 – Objetivos.....	8
CAPÍTULO 2: BASES DEL PFEM.....	9
2.1 – Introducción.....	9
2.2 – Algoritmo básico del PFEM.....	10
2.3 – Descripción del algoritmo de interacción fluido-estructura (FSI).....	11
2.4 – Formulación del FIC y FEM para un fluido incompresible.....	13
2.4.1 – Transformación de la ecuación de balance de masa.....	15
2.4.2 – Discretización en elementos finitos (EEFF).....	16
2.4.3 – Algoritmo del paso fraccionado para las variables de fluido.....	18
2.5 – Esquema escalonado para el problema FSI.....	20
2.6 – Tratamiento del contacto entre el fluido y sólido.....	20
2.7 – Generación de una nueva malla.....	22
2.8 - Identificación de las superficies de contorno.....	22
2.8.1 – Contacto entre interficies sólido-sólido.....	23
CAPÍTULO 3. DESARROLLO, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PFEM.....	25
3.1- Desarrollo del PFEM para estudio de la estabilidad de diques.....	25
3.2 Validación del PFEM con ensayos realizados en los Laboratorios de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).....	25
3.3 Estrategias de mallado en PFEM.....	34
3.3.1 El método alpha-shape.....	35
3.3.2 Distintas mejoras en el tratamiento de las mallas en los modelos de flujo.....	36
3.3.3 Mejora por zonas.....	36

3.3.4 Variación lineal de h.....	37
3.3.5 El método de las cajas.....	37
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UNA SECCIÓN DE UN DIQUE FORMADO POR CUBOS DE HORMIGÓN.....	39
4.1 Nueva metodología para la definición de un manto de bloques sobre un talud. Caso perpendicular.....	39
4.2 Estudio del caso oblicuo.....	62
4.2.1 Desarrollo de una metodología para estudio del oleaje oblicuo.....	62
4.3 Aplicación del PFEM al estudio de morros de invernada.....	77
4.4 Generación de la geometría para el caso de estudio de la importancia del rebase en la seguridad de las superestructuras.....	81
CAPÍTULO 5: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR REBASES SOBRE ELEMENTOS Y EQUIPOS DE OBRA EN LA CORONACIÓN DE UN DIQUE.....	84
5.1 Motivación, objetivos y resumen del trabajo.....	84
5.2 Descripción de las tareas realizadas.....	84
5.3 Conclusiones.....	97
CAPÍTULO 6: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE UN ESTADO DE MAR SOBRE SECCIONES DE UN DIQUE EN ETAPAS CONSTRUCTIVAS Y DEFINITIVAS.....	98
6.1 Definición de una metodología para estudio de la estabilidad del manto de diques emergidos.....	98
6.1.1 Introducción.....	98
6.1.2 Estudio de estabilidad de un bloque aislado.....	99
6.1.2.1 Caso bidimensional.....	99
6.1.2.2 Caso tridimensional.....	101
6.1.3 Estudio de viabilidad. Aplicación a bloques de 150T.....	106
6.2. Resumen y conclusiones.....	113
CAPÍTULO 7: USO DEL PFEM PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE UN ESTADO DE MAR ACTUANTE SOBRE UNA MANIOBRA DE FONDEO DE UN CAJÓN.....	115
7.1. Introducción y alcance del trabajo.....	115
7.2. Los modelos físico-matemáticos y las estrategias numéricas.....	115
7.2.1. Simulación de los cabrestantes.....	115

7.2.2. Control del oleaje.....	116
7.3. Estudio de viabilidad.....	117
7.3.1 Introducción.....	117
7.3.2 El modelado numérico.....	119
7.4 Resultados más significativos obtenidos en los análisis realizados durante el proceso de validación.....	123
7.5 Conclusiones del estudio realizado para la validación.....	130
7.6 Aplicación de la metodología al diseño del proceso de fondeo.....	131
7.7 Diseño de nuevas operaciones de fondeo.....	136
7.8 Conclusiones.....	144

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA.....146

8.1 – Conclusiones.....	146
8.2 – Investigación futura.....	147

CAPÍTULO 9: REFERENCIAS..... 148

9.1 – Referencias.....	148
9.2 – Software utilizado.....	148

ANEXOS

Anexo 1. Desarrollos del Método de Elementos Finitos y Partículas (PFEM) para estudio del movimiento de objetos bajo acción de las olas. Aplicación al estudio de la estabilidad de diques

Anexo 2. Resultados de los experimentos realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona sobre estudios de los frentes de onda generados por la apertura rápida de una compuerta

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer profundamente a mi tutor Eugenio Oñate por su inestimable ayuda y por el constante aliento recibido para finalizar el presente documento a lo largo del desarrollo de la tesina. También a Benjamín Suárez por su colaboración en la misma. Y, por supuesto, a mi cotutor y amigo Miguel Ángel Celigueta por el soporte y por el inagotable ánimo a lo largo de todo el viaje.

INTRODUCCIÓN

Para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, en la presente tesina se utiliza el Método de los Elementos Finitos y Partículas (PFEM), desarrollado por Oñate et al [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] y [9] e Idelsohn [2], [3], [4], [7], [8] y [9].

El PFEM usa una descripción lagrangiana de los dominios fluido y sólido para la formulación de las ecuaciones que gobiernan el problema. En la formulación lagrangiana se sigue el movimiento de los puntos materiales del dominio. De esta manera, en el dominio discretizado, un nodo se puede interpretar como un punto material del dominio (denominado “partícula”).

El hecho de que el PFEM represente los nodos de fluido y de sólido como partículas que se mueven libremente y que incluso pueden separarse del dominio al que pertenecen permite representar, por ejemplo, el efecto de gotas de agua o masas de fluido aisladas. Los nodos de los diferentes dominios del problema de estudio están relacionados mediante una malla, en la que se resuelven mediante el método de los elementos finitos tradicionales las ecuaciones que gobiernan el problema. Además, en cada paso de tiempo se aplica el modelo de interacción entre fluido y sólido, el cual cambia algunas propiedades de las variables nodales de la malla para simular la interacción entre fluido y estructura.

El hecho de utilizar una descripción lagrangiana comporta la desaparición del término convectivo de la ecuación de balance de la cantidad de movimiento de Navier-Stokes. No obstante, la necesidad de tratar convenientemente la condición de incompresibilidad del fluido se puede obviar en la formulación lagrangiana. El uso de interpolaciones estándar de elementos finitos puede provocar problemas de bloqueo volumétrico tal y como describen Donea y Huerta [1]. En el PFEM, el bloqueo volumétrico se evita mediante el procedimiento de cálculo finito incremental (FIC) desarrollado por Oñate [7].

El esquema de la presente tesina se detalla a continuación. En el capítulo 2 se describen las particularidades del PFEM. En el siguiente capítulo se describe los nuevos desarrollos y la calibración y validación a las que fue sometido el PFEM durante el desarrollo de la tesina. Seguidamente, en los capítulos 4, 5 y 6, se explica la metodología desarrollada para el estudio del efecto del oleaje sobre la estabilidad de los bloques que forman un dique y los objetos colindantes. En el capítulo 7 se desarrolla una aplicación para el caso particular de una maniobra de fondeo de cajones. Para terminar, los dos últimos capítulos se dedican a las conclusiones extraídas a partir de los resultados obtenidos en los capítulos precedentes, a listar las referencias utilizadas y a los anexos.

OBJETIVOS

La presente tesina tiene dos objetivos fundamentales:

1. Desarrollo de una metodología para el estudio de diques de bloques en puertos que sea capaz de simular los procesos de rebase y remonte de masas de agua y su efecto en la estabilidad de los bloques que los conforman además de sobre los objetos de obra situados en sus inmediaciones. Creación, por otra parte, de un sistema para el estudio de la viabilidad de una maniobra de fondeo de cajones.

2. Realizar las correspondientes simulaciones numéricas que permitan estudiar el comportamiento de los modelos desarrollados.

Complementariamente, el presente trabajo tiene también unos objetivos más académicos, los cuales son estrictamente necesarios para cumplir los objetivos expuestos anteriormente. Los objetivos complementarios son los siguientes:

1. El estudio del PFEM, base teórica del trabajo desarrollado en la presente tesina.

2. Aprendizaje del programa de software PFLOW basado en el PFEM, herramienta fundamental para poder realizar las simulaciones numéricas presentadas.

3. Iniciación al estudio del lenguaje informático C++ para poder interpretar el código fuente de PFLOW.

CAPÍTULO 2

BASES DEL PFEM

2.1 – INTRODUCCIÓN

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.

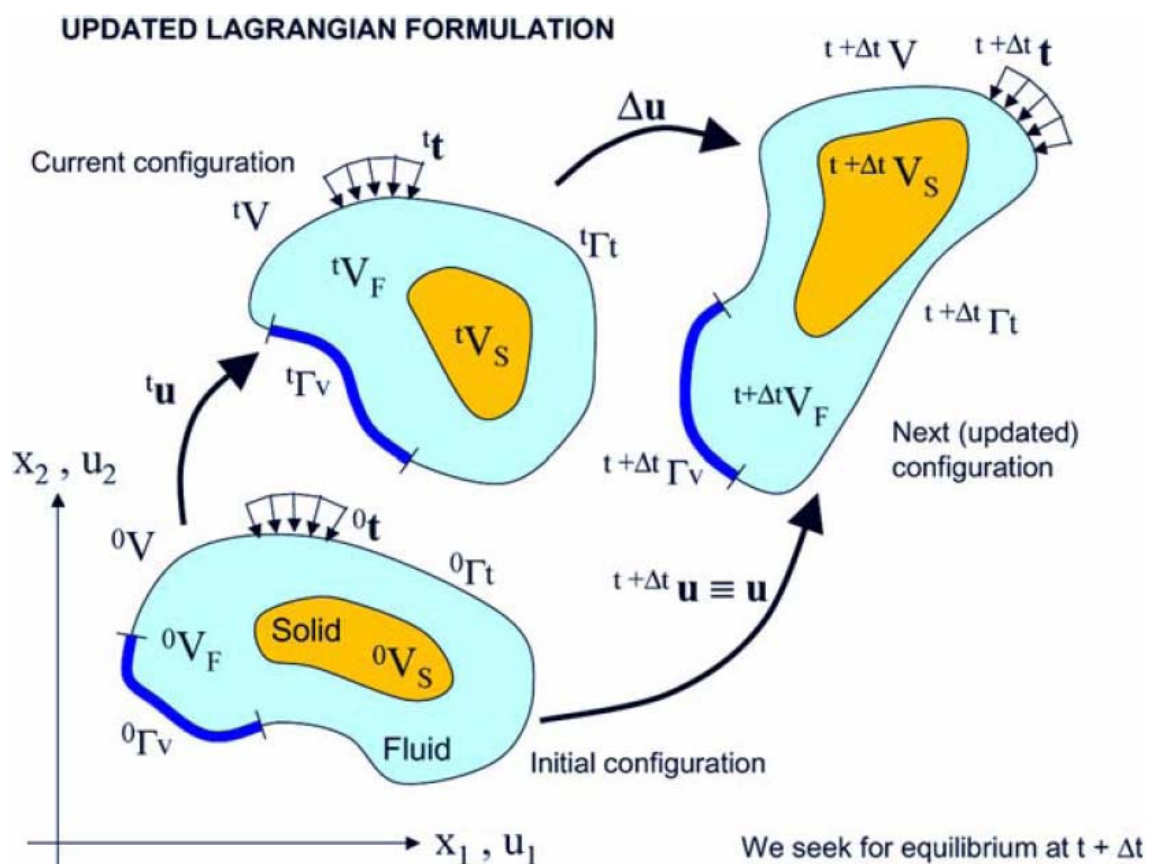


Figura 2.1.1. Descripción lagrangiana actualizada de un medio continuo con dominios fluido y sólido.

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).

Identificar los contornos de fluido y de sólido que definen los dominios ${}^n V$ 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).

Discretizar los subdominios de fluido y de sólido con una malla de elementos finitos ${}^n M$. En todos los casos expuestos en la presente tesis se utilizan tetraedros generados a partir de un esquema basado en el método de Delaunay (sección 2.7), Idelsohn [3] y [7].

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).

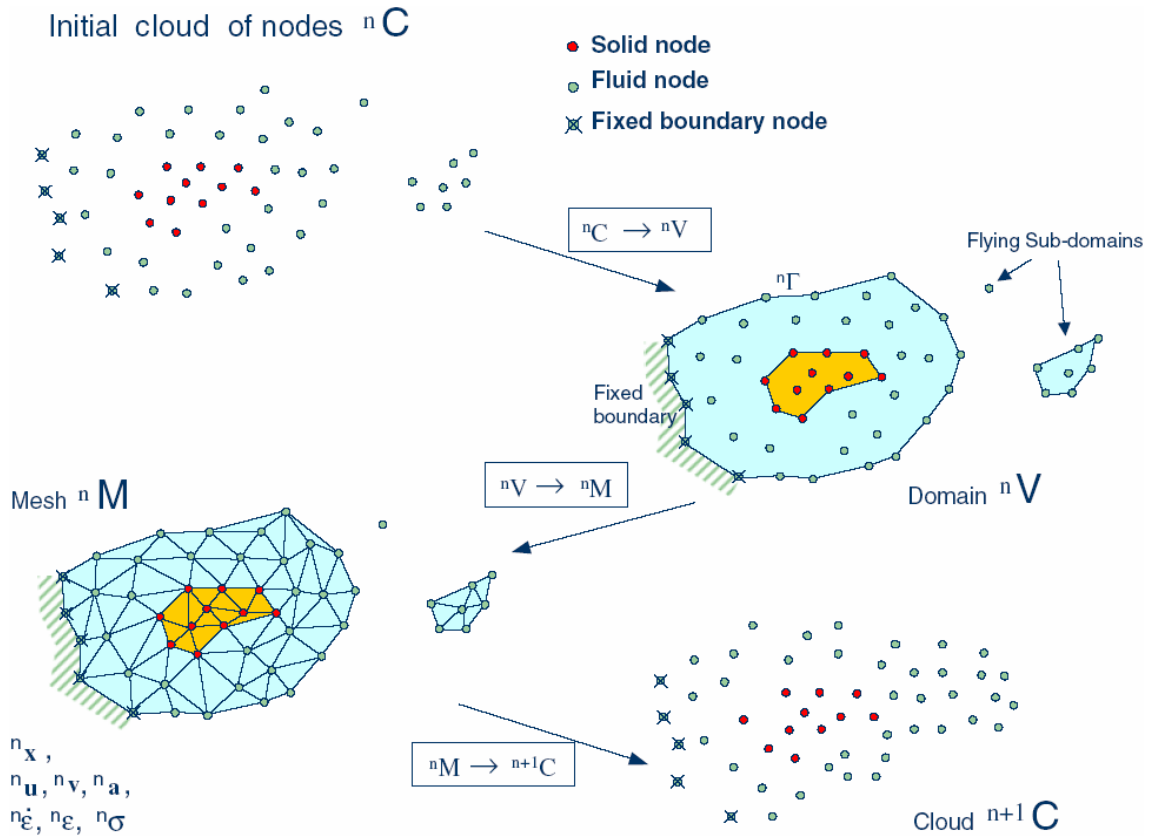


Figura 2.2.1. Secuencia de pasos para actualizar los nodos desde el tiempo n ($t = t_n$) al $n+1$ ($t = t_n + \Delta t$).

- 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.
- 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 Γ_v y Γ_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 Γ_{FS} , donde las variables cinemáticas (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) y las tensiones superficiales son idénticas para los dos subdominios.

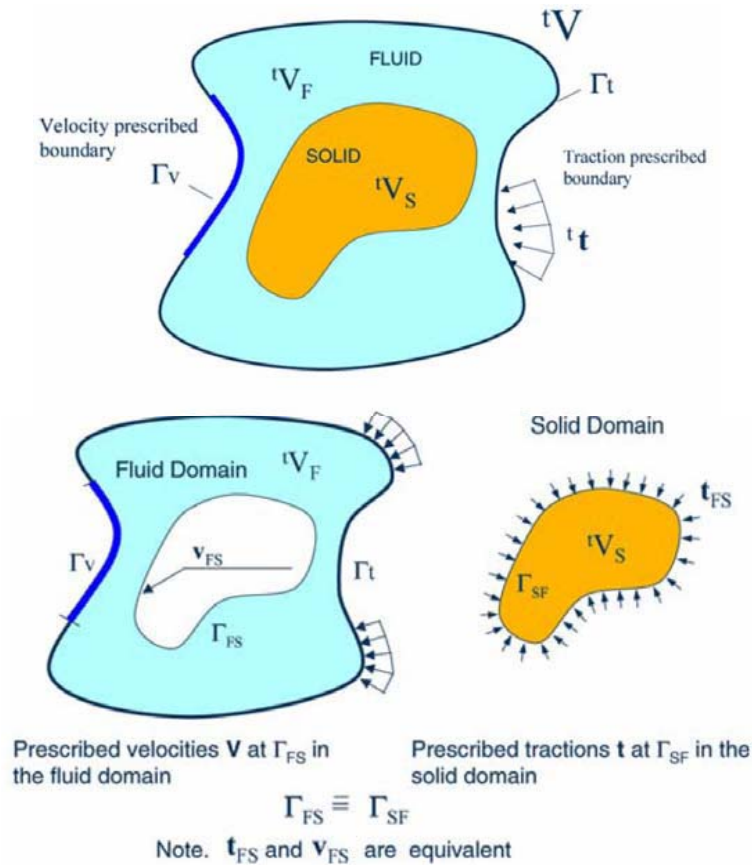


Figura 2.3.1. Partición del dominio de análisis V en subdominios de fluido y de sólido. Existe compatibilidad de tensiones y de las variables cinemáticas en la interficie entre los dos subdominios.

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, \mathbf{u} , \mathbf{v} y \mathbf{a} son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente, ε , $\dot{\varepsilon}$ y σ 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 Γ_{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 Γ_v y de tensiones superficiales en Γ_{FS} y Γ_t .

4 En caso de alcanzar la convergencia en el contorno Γ_{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. Este último caso no se contempla en la presente tesina.

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 [7], [8] y [9]. 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:

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

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

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), ρ es la densidad (constante) del fluido, b_i son las fuerzas de masa, σ_{ij} son las tensiones totales dadas por $\sigma_{ij} = s_{ij} - \delta_{ij} \cdot p$, p es la presión absoluta (compresiones definidas positivas) y s_{ij} son las tensiones viscosas, relacionadas con la viscosidad μ 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 δ_{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 [6]:

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:

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

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

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 Γ_t y Γ_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 [7], [8] y [9].

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 [7].

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 [6], [8] y [9]:

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

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:

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

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

donde δv_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 π_i , definido como:

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

Se puede expresar r_{mi} de la ecuación (2.16) en términos de π_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_{mi} se anula en el dominio de análisis (en un sentido estadístico). Seguidamente se procede a integrar por partes el término r_{mi} de la ecuación (2.16) y las tensiones desviadoras y los términos de presión de r_{mi} en la ecuación (2.15).

El sistema final de ecuaciones resulta ser entonces:

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

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

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

con $i,j,k = 1, n_d$. En la ecuación (2.18) $\delta \dot{\epsilon}_{ij}$ son las variaciones de las deformaciones virtuales. En la ecuación (2.20), $\delta \pi_i$ son funciones de ponderación apropiadas, y los pesos τ_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:

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

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):

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

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

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

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

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

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

En las ecuaciones anteriores B es la matriz de variación de deformaciones y $m = [1 \ 1 \ 0]^T$ 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 nF 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:

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

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 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:

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

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: $0.01 \leq \Delta t \leq 0.1$ s.

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 nV_F . Para ello se necesita la matriz jacobiana para transformar las derivadas ${}^{n+1}V_F$ espaciales y el diferencial de volumen de nV_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.

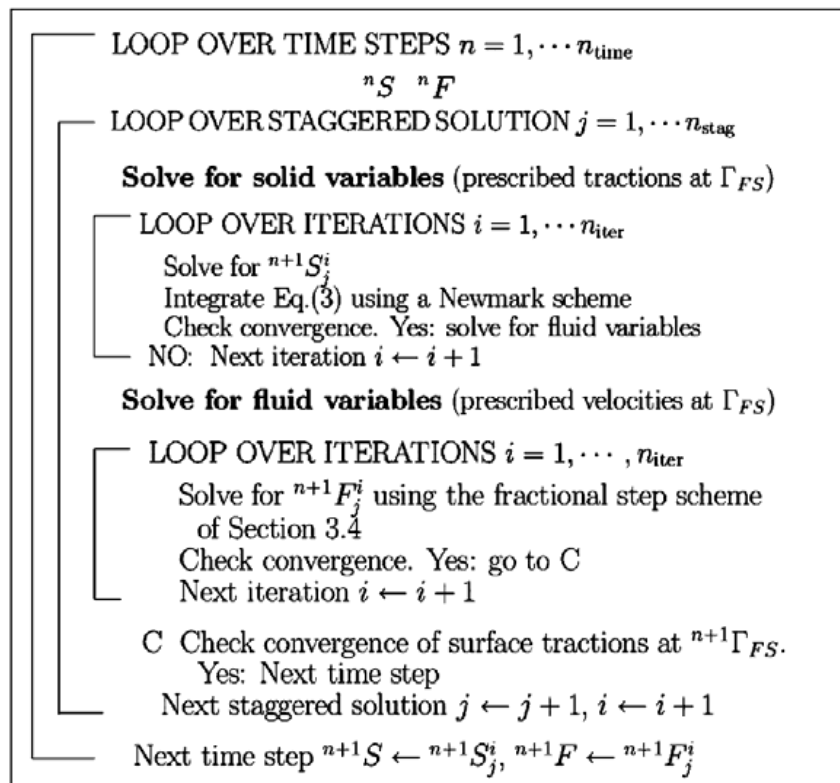


Figura 2.5.1. Esquema para el problema FSI

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

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.

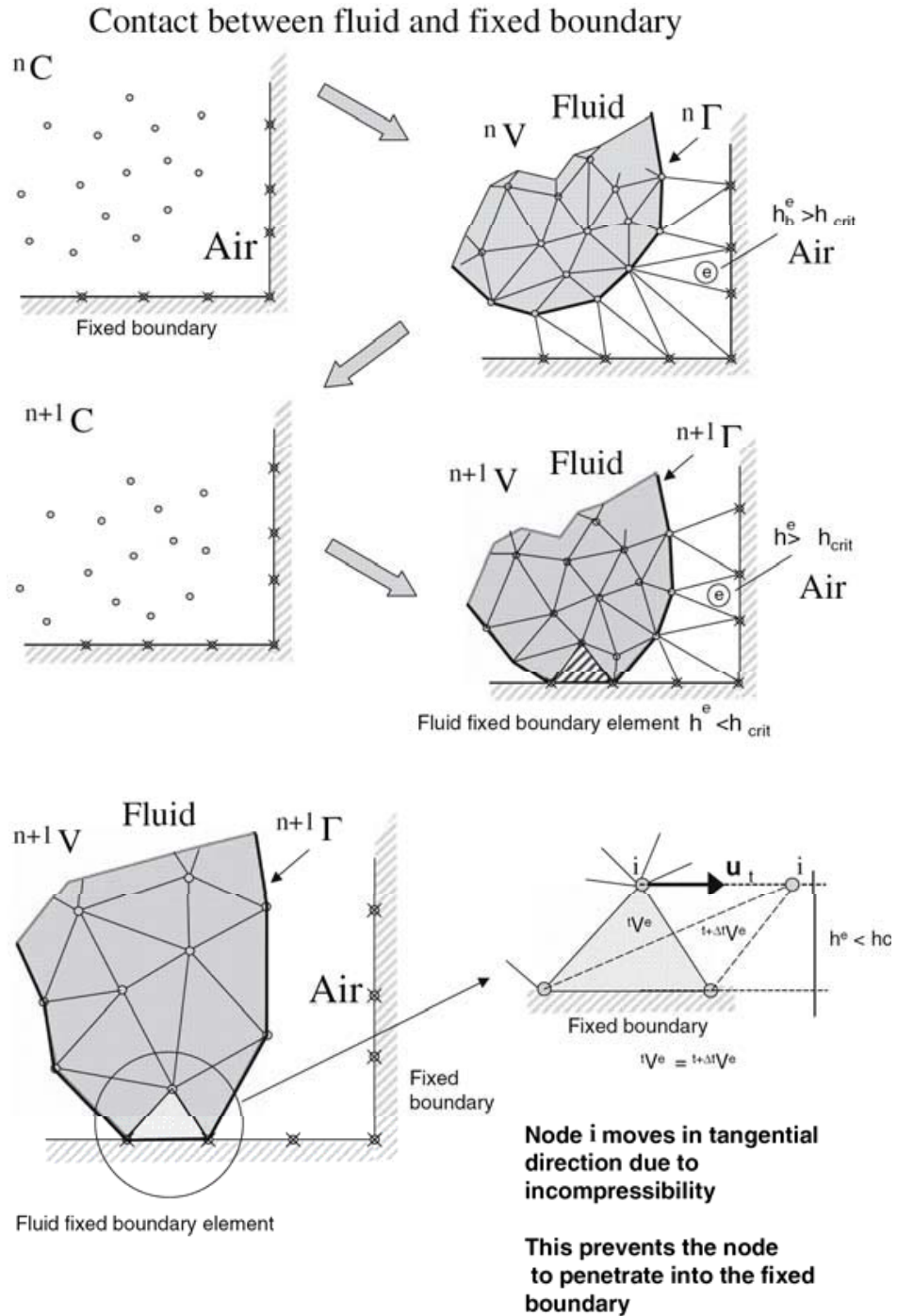


Figura 2.6.1. Tratamiento de la condición de contacto entre la interficie de fluido y sólido (pared).

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).

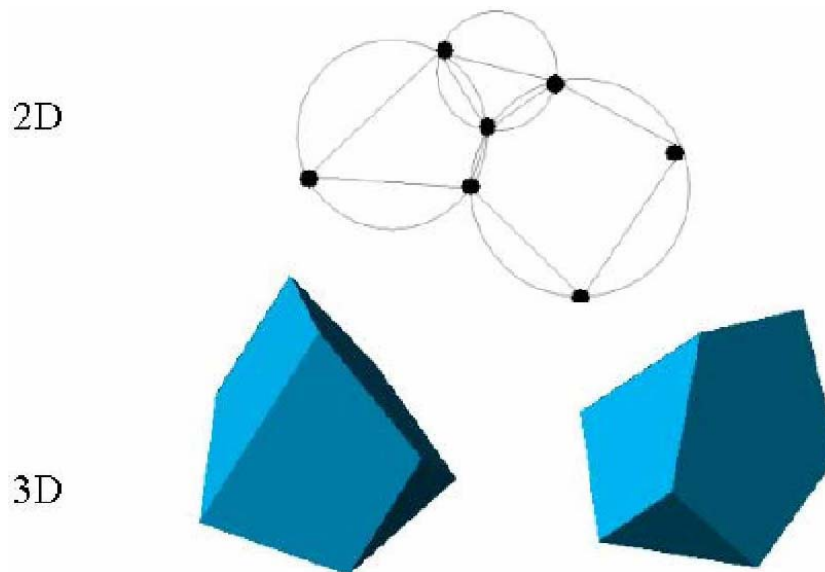


Figura 2.7.1. Generación de mallas no estándar combinando diferentes polígonos (en 2D) y poliedros (en 3D) usando la técnica EDT.

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 [3].

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 αh se consideran nodos de contorno. En la práctica, α 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).

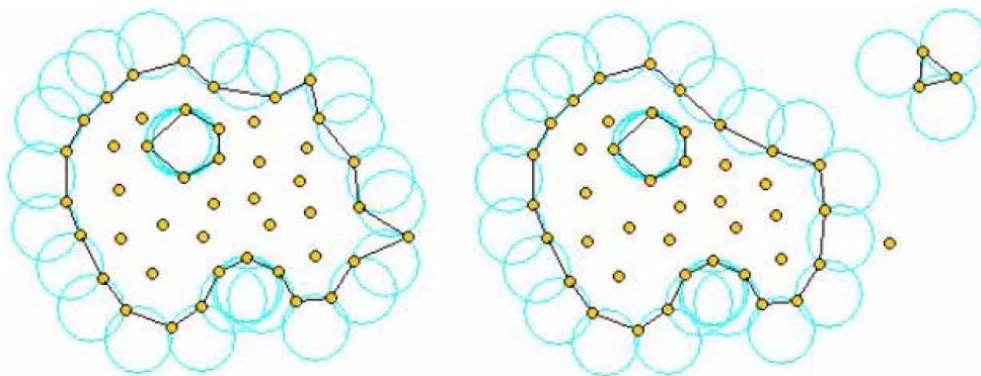


Figura 2.8.1. Identificación de partículas (o grupos de partículas) aisladas del conjunto inicial de nodos.

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.

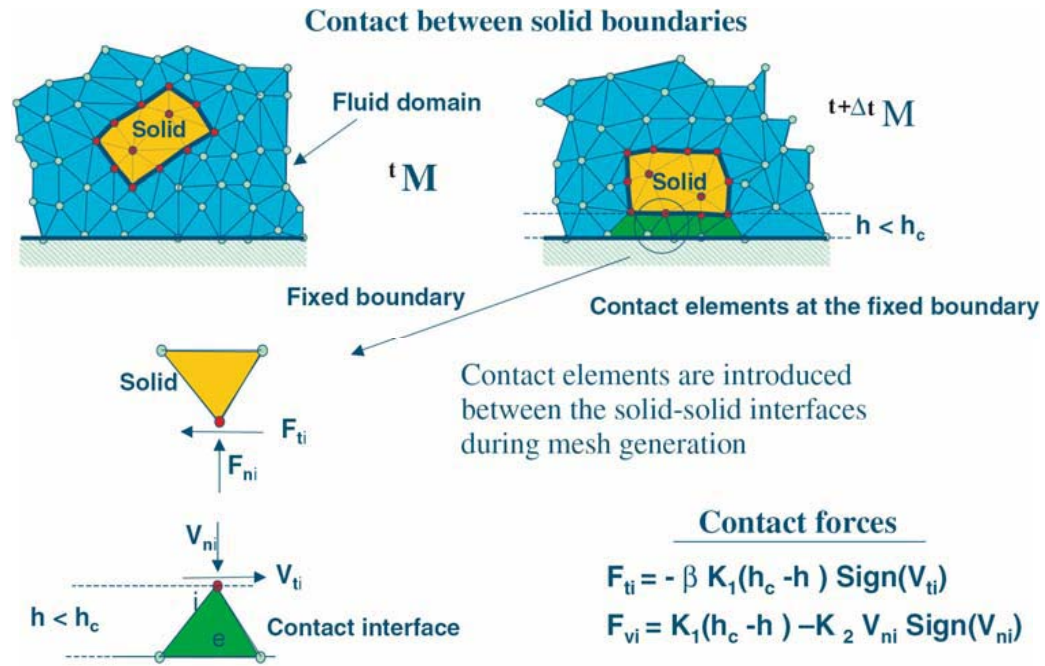


Figura 2.8.2. Condiciones de contacto entre dos interfacies de sólido.

3. DESARROLLO, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PFEM

3.1 Desarrollo del PFEM para estudio de la estabilidad de diques

Durante el último año se ha avanzado en el desarrollo del PFEM y en su aplicabilidad al estudio del movimiento de objetos bajo la acción del oleaje, en concreto al estudio del movimiento de bloques en diques de escollera y también a la seguridad de elementos de obra (vehículos, etc.) y personas y sometidas al impacto de una ola que rebase el dique.

3.2 Validación del PFEM con ensayos realizados en los Laboratorios de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

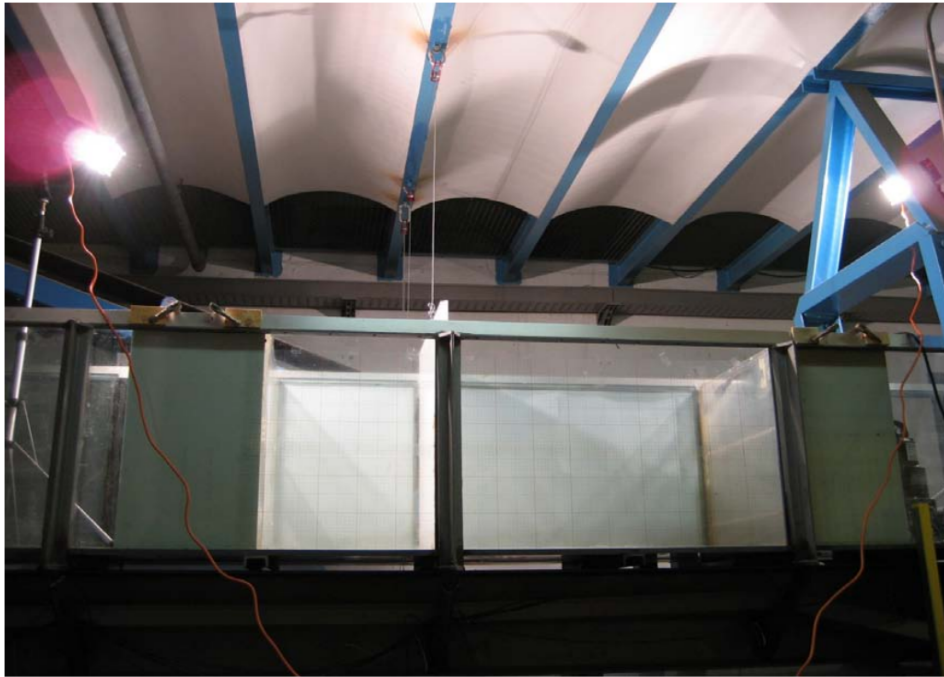
Con objeto de validar la precisión y aplicabilidad del PFEM, el estudio de situaciones de rebase y la predicción del movimiento de objetos sometidos al impacto de corrientes de agua se han llevado a cabo diversos ensayos experimentales a laboratorios de Hidráulica de la E.T.S.I.C.C.P de la UPC.

Paralelamente se han reproducido los mismos ensayos con el PFEM y se han comparado los resultados. En los apartados siguientes se muestran resultados de los ensayos experimentales y de las comparaciones entre los resultados numéricos obtenidos con el PFEM y con los experimentales. Cabe decir que la comparación entre ambos tipos de resultados ha sido buena, demostrándose así la aplicabilidad del PFEM para el estudio de los problemas arriba mencionados.

El presente informe contrasta numéricamente los resultados obtenidos en los Laboratorios de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona por el grupo FLUMEN en dinámica fluvial e investigación hidrológica, durante los ensayos enmarcados en el análisis experimental de frentes de onda generados por la apertura rápida de una compuerta. El objetivo de este estudio fue comparar los resultados obtenidos con las simulaciones realizadas mediante el método de los elementos finitos y las partículas (PFEM), para contribuir en su validación.

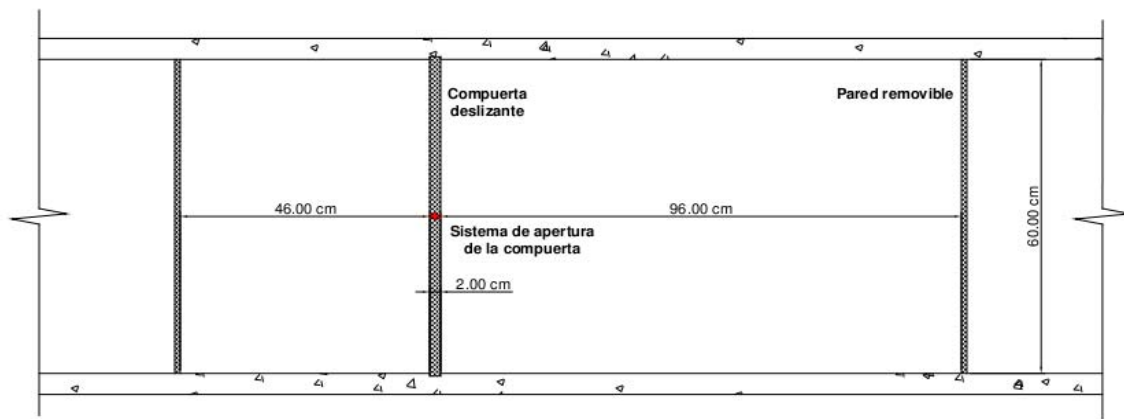
Los autores del análisis experimental fueron los miembros de FLUMEN José Luis Aragón Hernández, Belén Martí Cardona y Martí Sánchez-Juny.

Puesto que se trata de un problema de evolución en mecánica de fluidos incompresibles, la bondad del comportamiento del método PFEM será puesta a prueba.

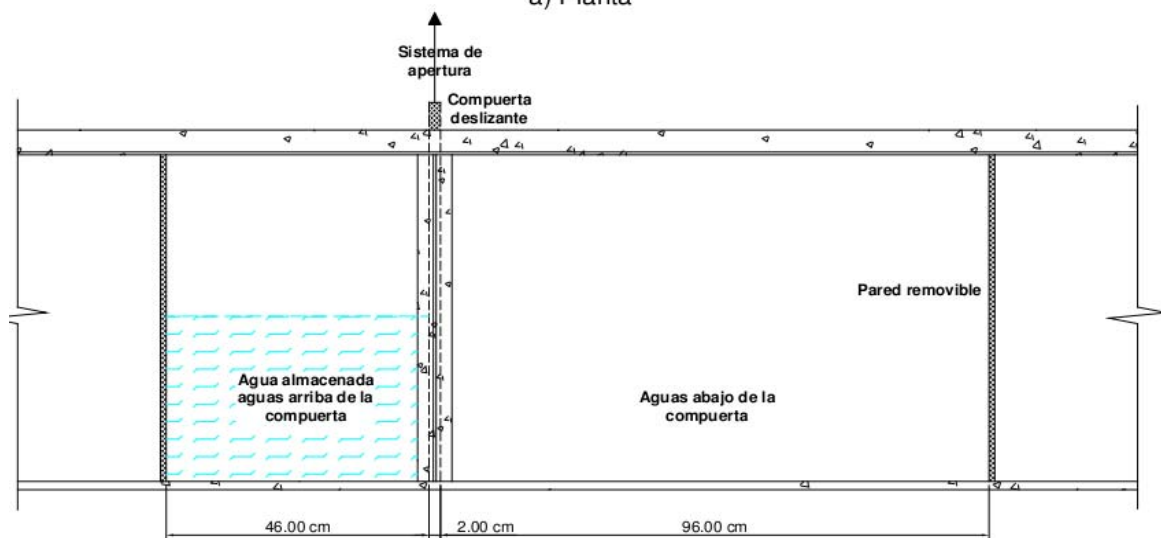


3.1. Imagen del canal de las instalaciones del FLUMEN

Los ensayos se llevaron a cabo en el canal de pendiente variable del FLUMEN, en el Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. El canal está formado por cajeros de vidrio en sección rectangular, con un ancho de 0,6 m. Se dispuso en todos los ensayos en posición horizontal.



a) Planta



a) Perfil

3.2. Geometría del canal del FLUMEN

Deben distinguirse dos tipologías de ensayo, en las cuales se levantaba una compuerta ligada a un sistema de contrapesos y poleas que permitía una apertura rápida, controlada y repetitiva para iguales cargas de agua, aguas arriba de la misma. Dichos niveles establecían la condición inicial de cada ensayo. En ambas tipologías de ensayo el eje de la compuerta de 2 cm de espesor se colocaba a 0.47 m del contorno de cierre aguas arriba:

1. Ensayos con recinto cerrado (en depósito). El contorno de cierre aguas abajo se situaba a 1.44 m del de aguas arriba, resultando un recinto cerrado de esa longitud. Dentro de este grupo se realizaron ensayos con el fondo teóricamente seco y con una lámina de 5 cm de agua. Sin embargo, hay que destacar que se han simulado situaciones más semejantes a las de los ensayos, en las cuales los niveles variaban ligeramente debido a las pérdidas que sufría la compuerta.

2. Ensayos con recinto abierto (en canal). En este caso se retiró el contorno aguas abajo, resultando un canal abierto. El informe de FLUMEN no detalla la longitud total del canal; la longitud simulada es de 3 metros, valor importante pues, en la simulación, al final del canal se forma una sección crítica.

3. Ensayos con recinto abierto en los que se colocaron cuerpos cilíndricos y prismáticos para analizar su desplazamiento al recibir el frente de onda, y la interacción que causaban en él.

Objeto	Material	Masa (kg)	Dimensiones (m)
Prisma cuadrado	Acero	5.641	L=0.06, h=0.20
Cilindro circular	PVC	0.406	$\phi=0.05$, h=0.133

Tabla 3.1. Características de los objetos expuestos al flujo

En el Anexo 2 se describen con detalle los ensayos arriba mencionados.

La carga de agua en todos los ensayos era de 0.30m, aunque, como ya se ha comentado, los verdaderos niveles iniciales oscilaban pocos milímetros respecto a este valor debido a las pérdidas de la compuerta.

La compuerta estaba formada por una plancha de metacrilato rectangular que disponía de su extremo inferior biselado y, como ya se ha comentado, estaba sujeta a un sistema de contrapeso y poleas que, a igualdad de carga aguas arriba de la compuerta, permitía su izado de manera repetitiva.

Este sistema de izado fue diseñado para asegurar:

Una apertura lo más rápida posible para la formación de un frente onda lo más rápidamente variable posible.

Igualdad de la fuerza de izado en todos los ensayos a fin de poder realizar ensayos comparables entre sí.

Así, el sistema consistía en un cable de acero de 5 mm de diámetro sujeto a la compuerta por un extremo y por el otro unido a dos bloques cilíndricos de hormigón de aproximadamente 35Kg, mediante un sistema de tres poleas. Antes de iniciar cada ensayo los bloques de hormigón se encontraban apoyados en un soporte a una altura suficiente que permitía mantener la compuerta cerrada. Un mecanismo permitía hacer caer el soporte y con él los bloques de hormigón, provocándose el izado súbito de la compuerta.

Se han introducido en las simulaciones numéricas las leyes de apertura de la compuerta en cada caso, según los datos de elevación en función del tiempo aportados por el informe de FLUMEN (Anexo 2).

Para la medición de las variables hidráulicas en laboratorio y, tratándose en especial de un fenómeno que tiene un comportamiento rápidamente variable, se usó una cámara de alta velocidad MotionPro RedLake Midas, cedida por el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC. Se trata de un sistema de captación de imágenes no intrusivo que, por tanto, no alteraba el flujo en el interior del recinto de ensayo.

La cámara se configuró para una captura de 100 instantáneas por segundo que se comprobó suficiente para captar con detalle el fenómeno. Ello requirió de un laborioso post-

proceso para transformar las imágenes capturadas en secuencias temporales de perfiles de la lámina de agua y de calados.

Estas imágenes se procesaron para determinar en cada una de ellas la altura de la lámina de agua adyacente al cristal anterior del recinto de ensayo en una serie de secciones transversales del recinto referidas como posiciones de los sensores. Todas las imágenes fueron filtradas mediante un cierre y apertura morfológicos consecutivos, con un elemento estructural de 3×3 píxeles. Estos filtros eliminan de la imagen puntos oscuros, como los de la malla milimetrada en el cristal anterior del recinto del ensayo, así como pequeños brillos debidos en general a la reflexión de la luz sobre gotas de agua adheridas al cristal del recinto.

En la imagen inicial de cada ensayo se determinó mediante observación directa la altura de agua en píxeles en la columna correspondiente a la posición los distintos sensores. Un código programado en Matlab permitió obtener la altura de agua en píxeles en la posición de cada sensor para el resto de las imágenes de los ensayos. Si la altura de agua en la columna del sensor S en la imagen I es H, el código evalúa en las ocho direcciones posibles el gradiente de intensidad de la imagen I+1 en la columna S en un entorno de la altura H. La altura de agua en la columna S de la imagen I+1 viene determinada por el máximo gradiente de intensidad.

Una malla milimetrada situada sobre el cristal anterior del recinto del ensayo permitió calcular la función de transformación de calado en píxeles a calado en metros, en las columnas de la imagen correspondientes a la posición de los sensores. Mediante estas funciones los calados obtenidos en número de píxeles por el código Matlab se transformaron en medidas de longitud.

Las posiciones de los sensores, medidas desde el contorno aguas arriba son las siguientes:

RECINTO ABIERTO		RECINTO CERRADO	
Vertical	x (m)	Vertical	x (m)
S1	0.127	S1	0.127
S2	0.310	S2	0.310
S3	0.709	S3	0.663
S4	0.961	S4	0.861
S5	1.210	S5	1.062
-	-	S6	1.161
-	-	S7	1.262

Tabla 3.2. Posiciones de los sensores

Para poder contrastar los niveles medidos en los ensayos con los resultados de las simulaciones, estas incluyen a su vez un registro de niveles en los mismos puntos, llamados en software de PFEM, por extensión, sensores de superficie libre.

La simulación de los casos donde intervienen los cuerpos se ha analizado necesariamente mediante un modelo 3D, mientras que en el resto de casos es suficiente un modelo 2D.

En las simulaciones 3D el tamaño de elemento es sensiblemente mayor al de las 2D por motivos de eficiencia de cálculo. Por ello, en los modelos tridimensionales no se han podido incluir los pequeños niveles de agua que se dan inicialmente aguas abajo de la compuerta.

A continuación se contrastan los resultados de cada ensayo con los de la correspondiente simulación.

Recinto abierto con bloque cilíndrico

Los niveles iniciales en la simulación son, como valor medio de los medidos, 0.300m aguas arriba y 0.006m aguas abajo, según la siguiente geometría inicial:

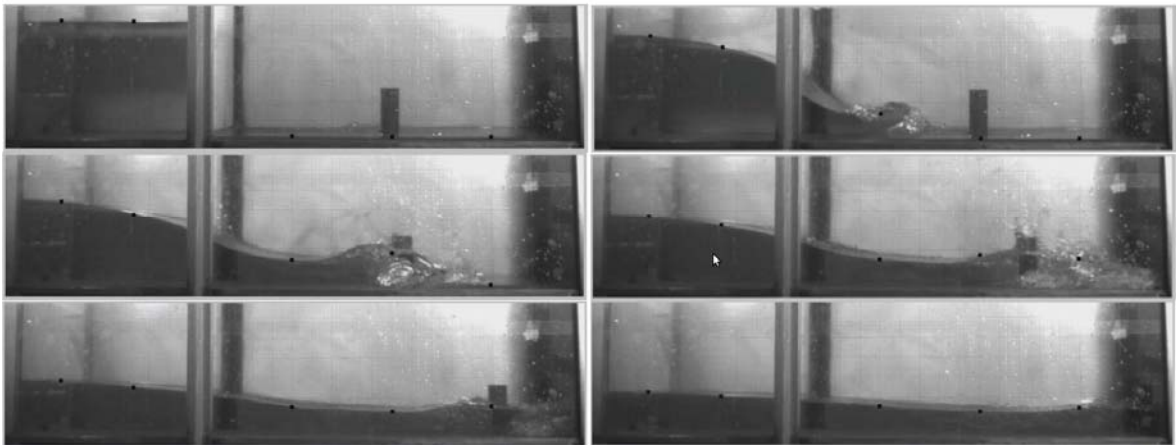


Figura 3.3. Ensayo en un recinto abierto con bloque cilíndrico

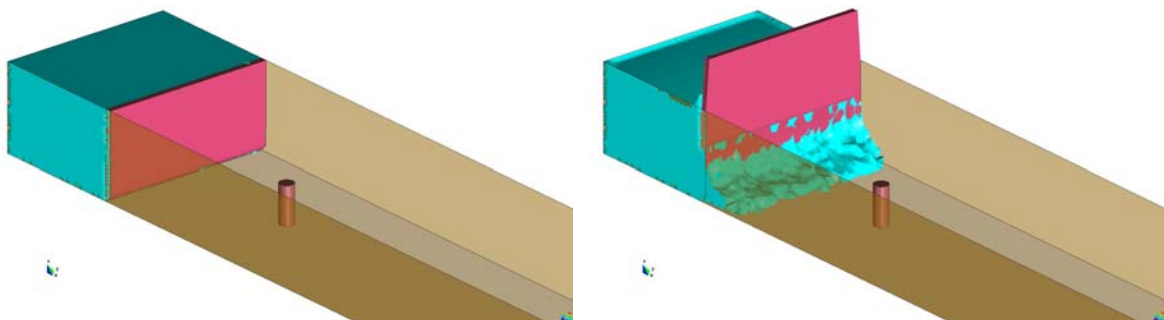


Figura 3.4a. Simulación en un recinto abierto con bloque cilíndrico

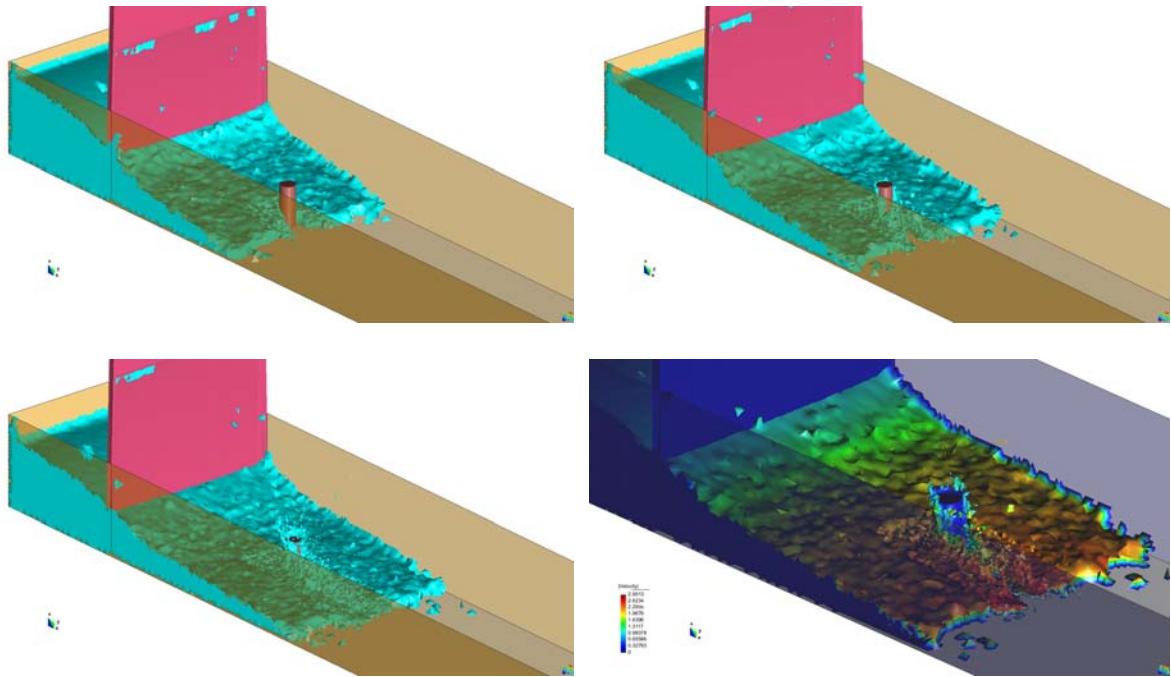


Figura 3.4b. Simulación en un recinto abierto con bloque cilíndrico (continuación)

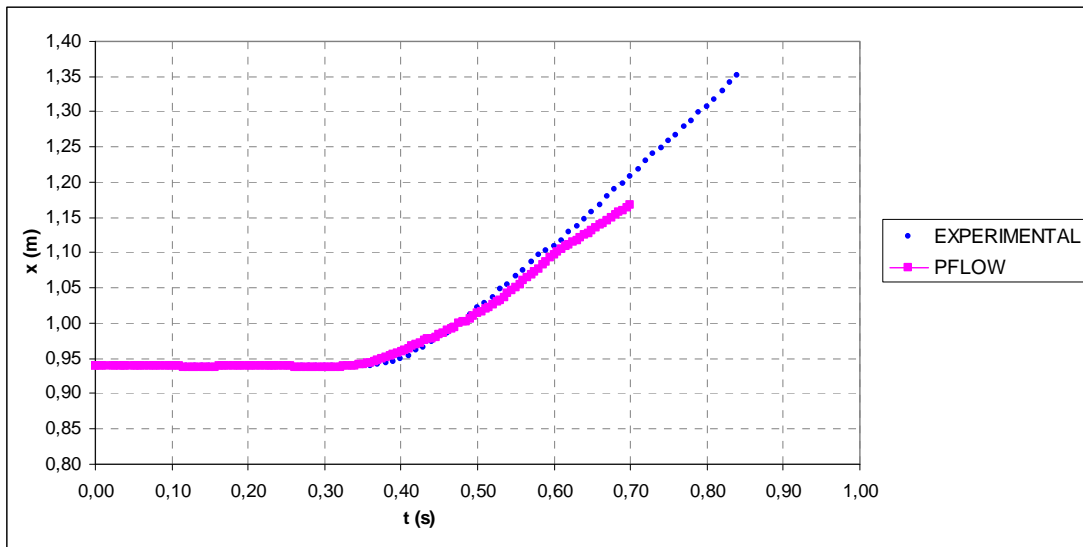


Figura 3.5. Resultados comparativos entre los ensayos en laboratorio y el PFEM para el cilindro

Recinto abierto con bloque prismático

Los niveles iniciales en la simulación son, como valor medio de los medidos, 0.304m aguas arriba y 0.008m aguas abajo.

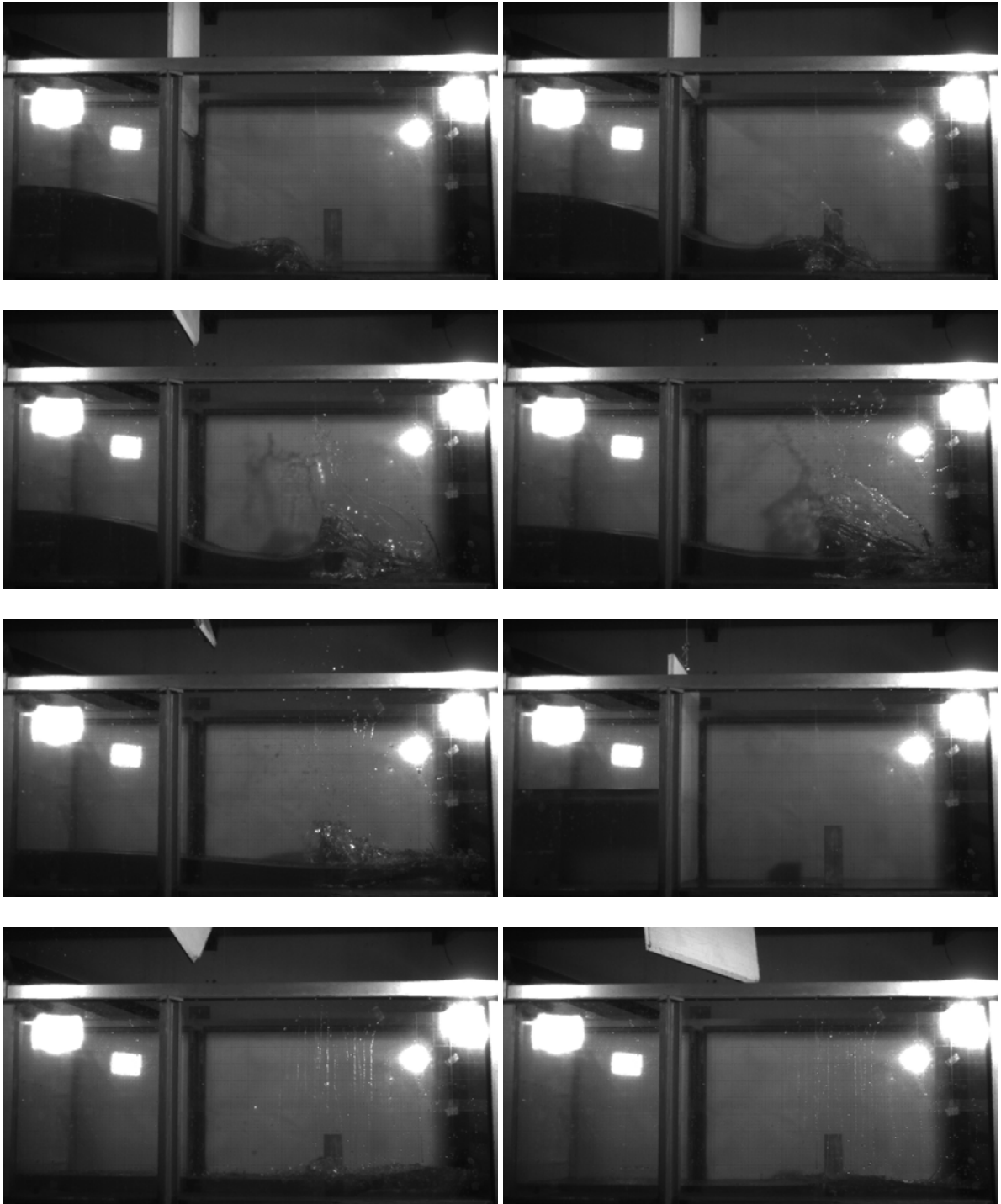


Figura 3.6. Ensayo en un recinto abierto con bloque prismático

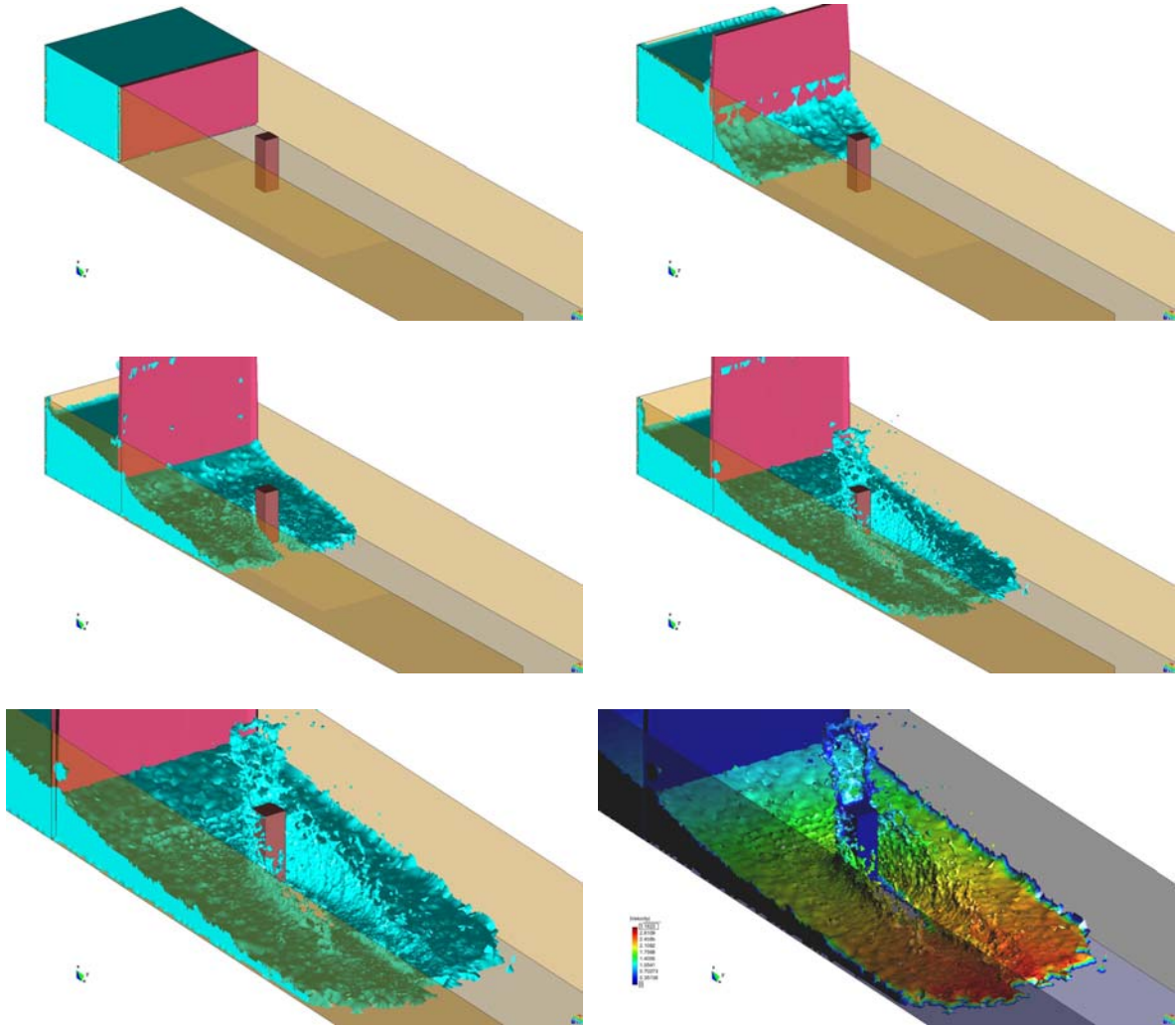


Figura 3.7. Simulación en un recinto abierto con bloque prismático

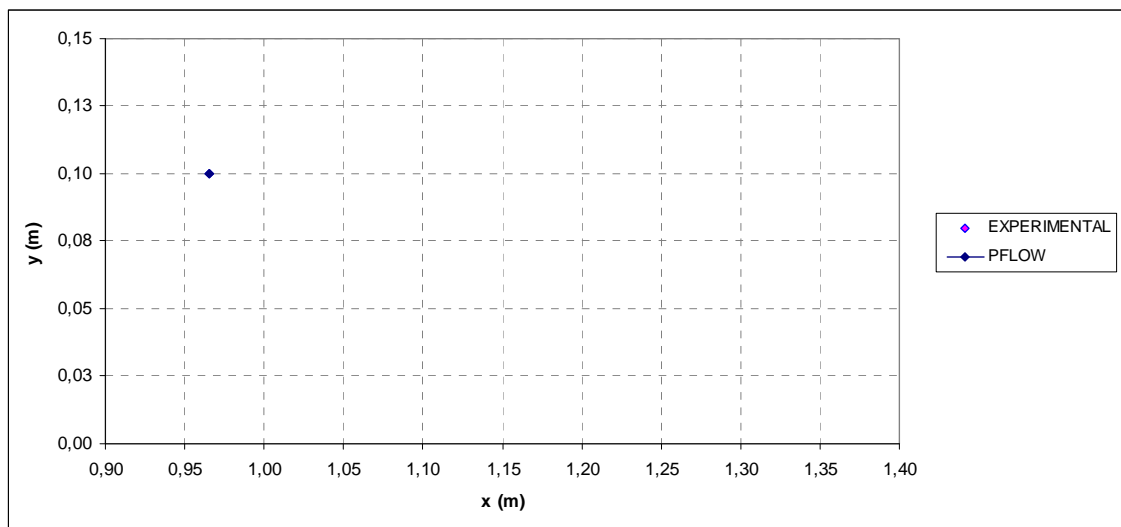


Figura 3.8. Resultados comparativos entre los ensayos en laboratorio y el PFLOW para el prisma

CASO	D_30_5	Situación de sensores	
Dimensiones	Long = 1,44 m; ancho = 0,60 m; h1 = 30 cm; h2 = 5 cm	S1	x = 0,1267
Malla	1 cm en el contorno, 2 cm en el resto.	S2	x = 0,3097
Máximo dt	0,002	S3	x = 0,6631
Volume correction	1	S4	x = 0,8607
Fraction Step Scheme	Fast	S5	x = 1,0621
Archivo GiD	D_30_5_2cm_04	S6	x = 1,1609
		S7	x = 1,2616

Tabla 3.3. Caída y flujo de una columna de agua. Solución con un modelo PFEM tridimensional

Como se ha comentado previamente, en el Anexo 2 se describen con detalle los ensayos experimentales presentados en páginas anteriores.

3.3 Estrategias de mallado en PFEM

Una vez generada la geometría base objeto de estudio mediante el generador GiD, se hace uso de una librería de malladores propia para generar la malla de cálculo inicial. Los vértices de esta malla formarán la nube de puntos inicial que constituyen el modelo numérico para resolver el problema a estudiar.

Previo a todo cálculo, hay que identificar las fronteras entre el dominio de agua y los múltiples contornos que lo rodean. Para este propósito, se utiliza el llamado método *alpha-shape*, que será comentado más adelante.

Una vez obtenidas las correspondientes fronteras, se procede a resolver las ecuaciones acopladas de movimiento. A partir de ahí se obtendrá el campo de velocidades y la presión como variables fundamentales resultantes.

Teniendo en cuenta los valores anteriores, se mueven los nodos de la malla a una nueva posición. Se obtiene así una nueva nube de puntos, que será mallada, esta vez y a partir de entonces, con la técnica de mallado denominada *Extended Delaunay Tesselation*. En la Figura 3.9 se muestran algunos detalles del proceso.

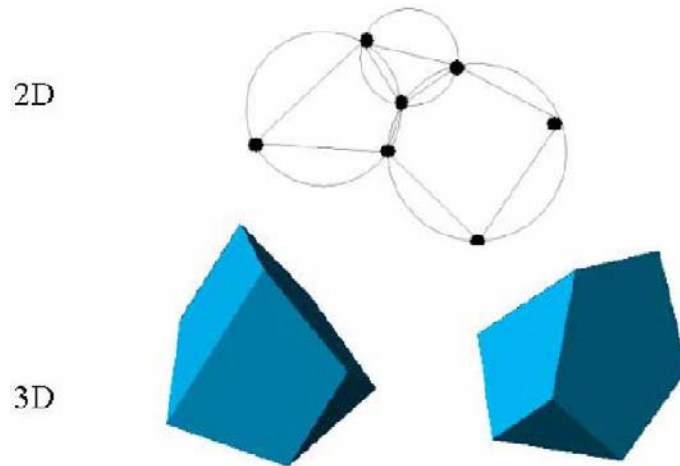


Figura 3.9. Generación de mallas a partir de diferentes colecciones de polígonos o poliedros utilizando la técnica *Extended Delaunay* tanto para el caso bidimensional como tridimensional

Finalmente, se aplica el método *alpha-shape* para identificar las nuevas fronteras entre dominios.

3.3.1 El método *alpha-shape*

PFEM necesita de una correcta definición del dominio y de los contornos. A veces los contornos se encuentran explícitamente identificados. Para el resto de los casos, la única información disponible es el conjunto de puntos o nodos del dominio, por lo que es imprescindible disponer de un algoritmo que permita reconocer aquellos del contorno. De esta necesidad nace el método *alpha-shape*.

Considerando que los nodos tienen una variable $h(x)$, donde $h(x)$ es típicamente la mínima distancia entre dos nodos cualesquiera, se usa el siguiente criterio: *todos los nodos contenidos en una esfera vacía de radio mayor a $\alpha \cdot h$ son considerados automáticamente como nodos de contorno*. En la Figura 3.10 se muestra un ejemplo de reconocimiento de contorno usando este método. En la práctica, α tiene un valor de aproximadamente 1,4. Una vez detectados los nodos del contorno, las superficies de frontera quedarán definidas por las correspondientes superficies poliédricas cuyos nodos pertenecerán a un único poliedro.

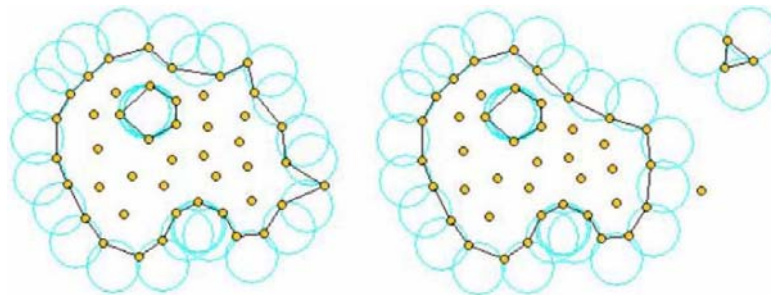


Figura 3.10. Identificación de un grupo de partículas a partir de una colección de nodos dada.

3.3.2 Distintas mejoras en el tratamiento de las mallas en los modelos de flujo

Tradicionalmente, los programas de flujo trabajan con mallas de tamaño uniforme. Este enfoque provoca que, a la hora de estudiar problemas de gran tamaño, las mallas resultantes presenten un número de elementos excesivamente elevado. Esto ha provocado búsquedas de soluciones para la reducción, en la medida de lo posible, del tamaño de estas mallas sin afectar de forma significativa a los resultados en los distintos problemas a estudiar.

En este sentido, a lo largo del desarrollo de la presente tesina se han ido incorporando mejoras progresivas en el tratamiento de las mallas que modelan los dominios o, lo que es lo mismo, del parámetro h de los nodos que forman la malla.

3.3.3 Mejora por zonas

Una primera mejora se obtuvo al asignar una dependencia de tamaños h de los nodos según un cierto eje coordenado, por ejemplo según el eje de abscisas. Esto permitió la definición de dominios con tamaños de malla crecientes o decrecientes o, en general, variables a lo largo de un determinado eje, cosa que dio lugar a un ahorro evidente en el número de elementos total de la malla realizando, por ejemplo, un mallado más fino alrededor de los objetos en estudio y más grosero en las lejanías del mismo. El único problema que presentó este método era que podían crearse de forma espuria cambios bruscos en las leyes de velocidades de las partículas en las interfases entre las distintas mallas, especialmente para el caso de cambios no suaves entre los distintos tamaños de malla. En la Figura 3.11 aparece un detalle de este método.

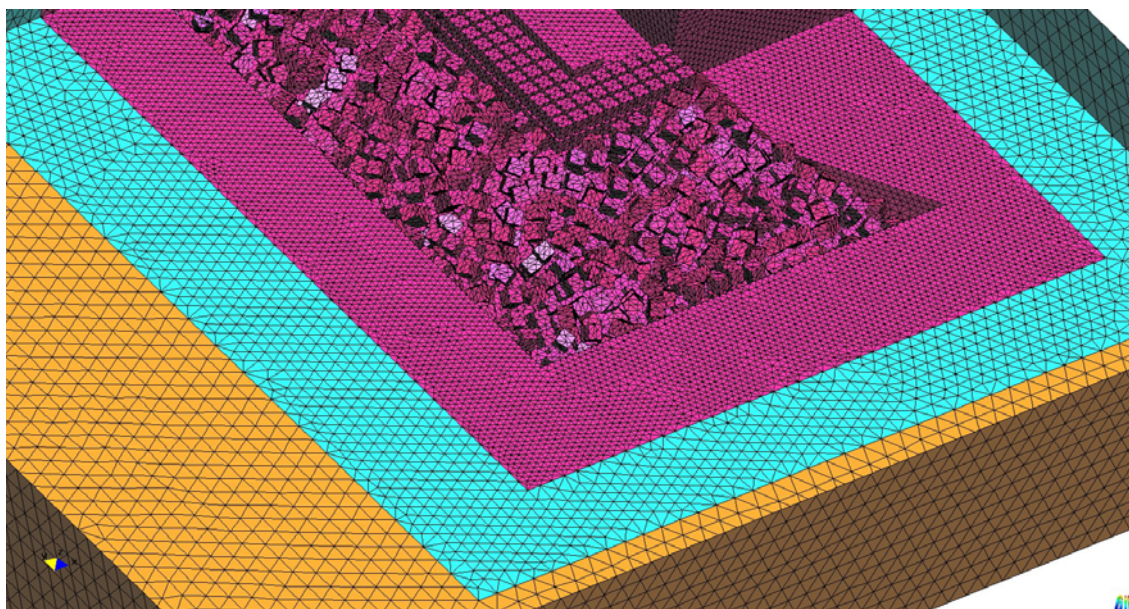


Figura 3.11. Detalle del mallado por zonas

3.6.4 Variación lineal de h

Una mejora que surge de forma natural, a partir del tratamiento de un mallado por zonas, es la variación lineal del tamaño de malla. Pese a que el ahorro en el número de elementos finales de la malla resultante no es especialmente elevado, la mejora yace en el hecho de que, al producirse un cambio progresivo en los tamaños de malla, los problemas de cambios bruscos en los campos de velocidades quedan eliminados. En la siguiente figura aparece un detalle de la mejora.

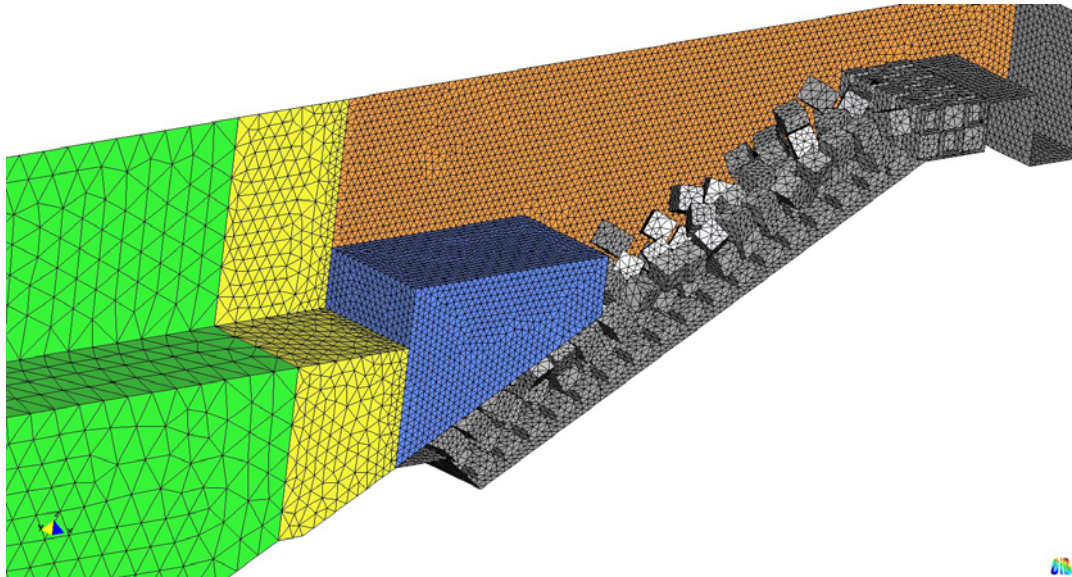


Figura 3.12. Detalle del mallado por zonas con cambio lineal

3.6.5 El método de las cajas

Se trata de la última mejora incorporada. En este último caso, el programa de flujo es capaz de trabajar con cajas concéntricas que encierran determinados tamaños de malla. En este caso sí que el ahorro en el número total de elementos de la malla puede ser sustancial, ya que es posible crear un conjunto de cajas concéntricas tan ajustadas al elemento móvil en estudio como se desee, concentrando entonces las mallas más finas en los alrededores inmediatos y mallando progresivamente de forma más grosera a medida que nos alejamos de él. En la Figura 3.13 se muestra una malla generada con este método.

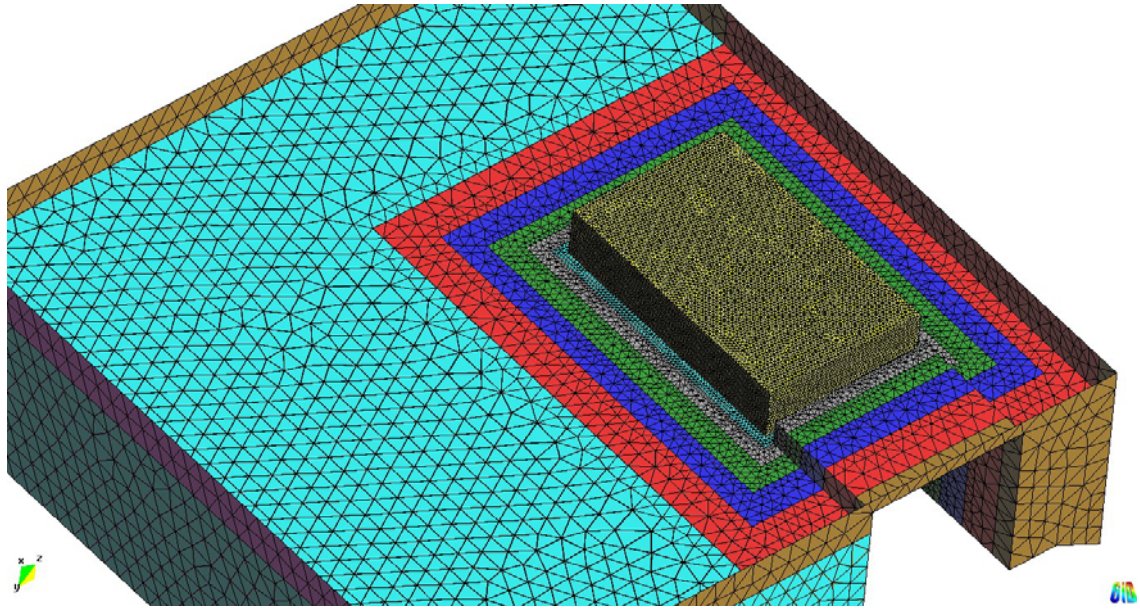


Figura 3.13. Detalle del mallado con cajas

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UNA SECCIÓN DE DIQUE FORMADO POR CUBOS DE HORMIGÓN

4.1 Nueva metodología para la definición de un manto de bloques sobre un talud. Caso perpendicular.

Se detallará una metodología para la definición de un conjunto de bloques prismáticos sobre un talud, de manera que configuren un manto de bloques sobre dicho talud. Para ello se ha desarrollado un método para generar una malla de elementos finitos que discretice el conjunto de bloques y los espacios de estos, de manera que sea posible la simulación del impacto del oleaje sobre los bloques con el PFEM.

En las líneas siguientes se explica la metodología de definición de un manto de bloques desarrollada en su aplicación al diseño de un dique de abrigo principal de un puerto.

Partiendo de los planos de CAD de las distintas secciones de dique, escogemos la sección transversal del mismo que más se ajuste a nuestras necesidades como punto de partida de nuestro trabajo. Finalmente se elije la sección de la figura que aparece a continuación. Las dimensiones del tramo que se va a estudiar son: 20 metros de anchura de sección, 100 metros de longitud de dique y 60 metros de altura. El calado del agua será de 35 metros.

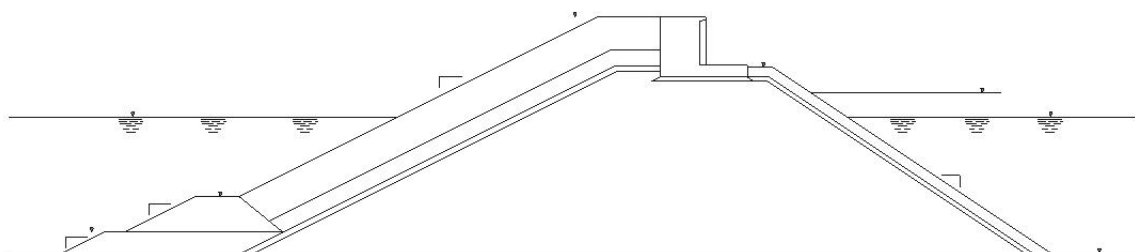


Figura 4.1 Sección transversal de partida del dique de estudio.

Antes de empezar a crear la geometría tridimensional del dique, necesitamos eliminar todo aquello que no vamos a utilizar, como por ejemplo los excesivos detalles en la geometría. Nuestro objetivo es tener una silueta lo más sencilla posible de la sección transversal de dique. Para ello, abrimos el archivo y suprimimos los datos sobrantes. Al acabar disponemos del siguiente perfil básico:

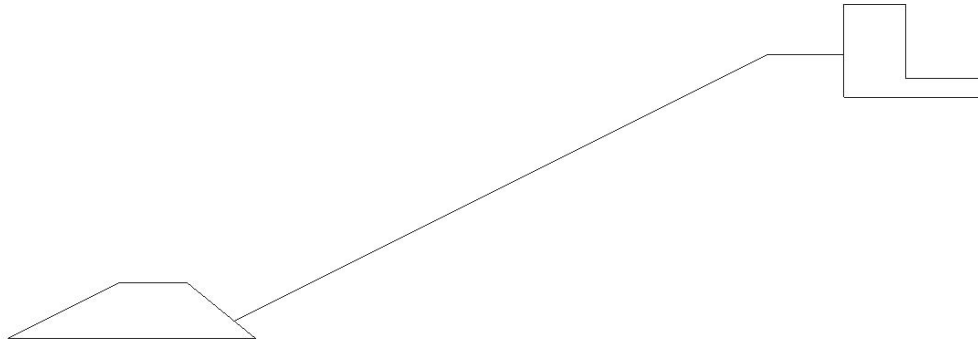


Figura 4.2. Perfil básico a extrudir.

El perfil simple anterior, una vez extrudido, nos servirá para generar el talud básico tridimensional del dique sobre el que se colocarán los cubos de hormigón.

Pasamos entonces a extrudir el perfil. Teniendo en cuenta que los cubos que formarán el dique serán de 4 metros de lado, se escoge un ancho de sección de dique a estudiar de 20 metros, lo que significa de 4 a 5 cubos a lo largo de ancho de sección.

Una vez realizada la extrusión, se obtiene la siguiente geometría tridimensional:

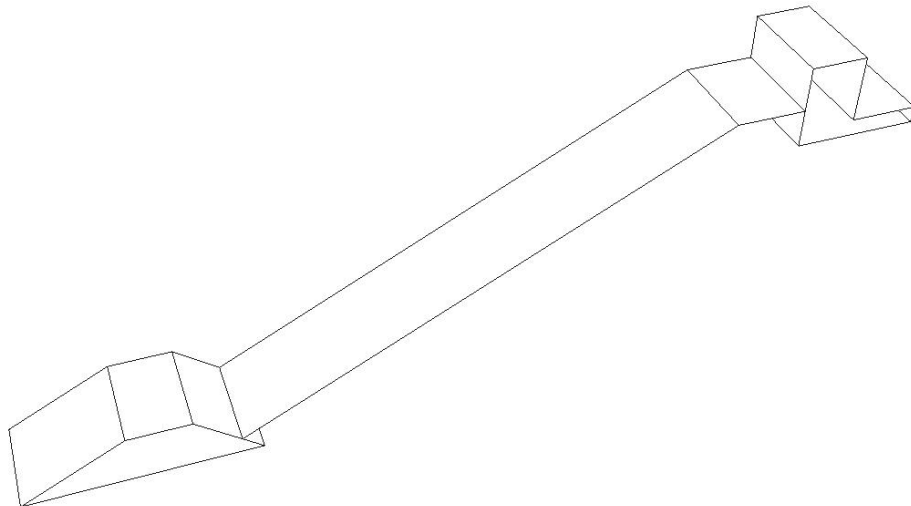


Figura 4.3. Geometría extrudida.

La anterior geometría constituye el talud del dique sobre el que habrá que colocar ahora los cubos de hormigón. Está claro que el diseño de los cubos individualmente es una tarea que no tiene sentido, ya que para construir el dique hay que dibujar una capa de aproximadamente 100 cubos en equilibrio en una pendiente de espesor dos o tres cubos.

Para ello se utilizará entonces un módulo de cálculo de dinámica de sólidos rígidos que nos permitirá lanzar los previamente dibujados 100 cubos sobre el talud, quedando ellos mismos automáticamente en equilibrio. Este programa dispone de un algoritmo ultrarrápido de detección de contactos entre multicuerpos. Además permite introducir multitud de variables que afectarán notablemente al comportamiento de los sólidos de estudio, como son el peso, la elasticidad, el rozamiento, la separación media o la penetración entre objetos.

Previamente al lanzamiento de los cubos, no obstante, hay que preparar la geometría que se va a utilizar. Se trazan entonces sendos planos verticales a ambos lados del talud para que no se escapen los cubos al dejarlos caer. La altura de tales planos será igual al espesor de diseño de la capa de cubos, con lo que los cubos que sobren caerán por ambos lados de la sección de dique. Un plano horizontal situado bajo el dique se ocupará, además, de detener el movimiento de los cubos sobrantes.

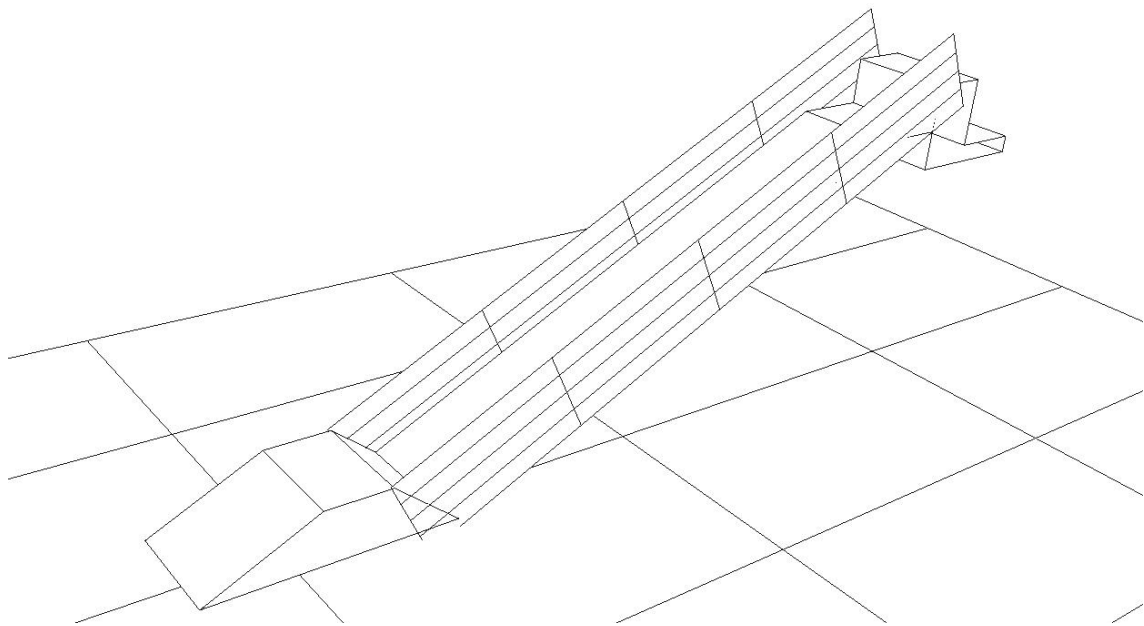


Figura 4.4. Planos auxiliares: laterales y horizontal.

Dibujamos ahora los cubos de la coronación del dique. Están colocados al tresbolillo, formando una matriz transversal de 3x2 cubos que se repite longitudinalmente. Para la construcción de esta estructura, se dibuja la matriz bidimensional de cubos 3x2 y se clona las veces necesarias. El proceso es el siguiente: en primer lugar se dibuja la unidad básica de cubos que posteriormente serán clonados

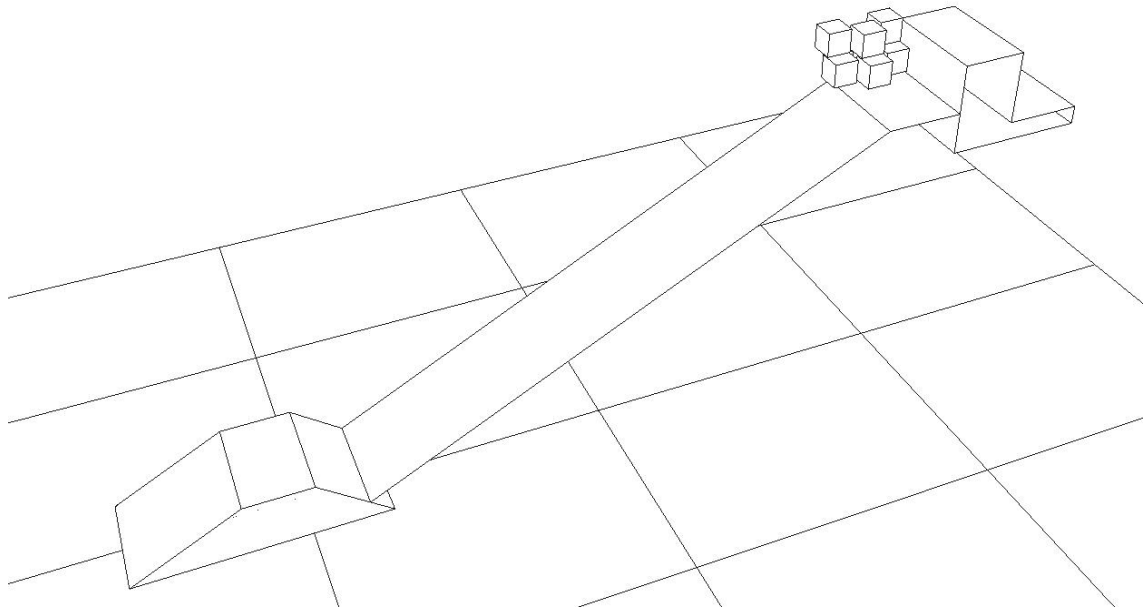


Figura 4.5. Matriz inicial de cubos que será clonada

Clonando la matriz varias veces con la separación entre grupos de cubos apropiada se obtiene la superestructura de la coronación del dique.

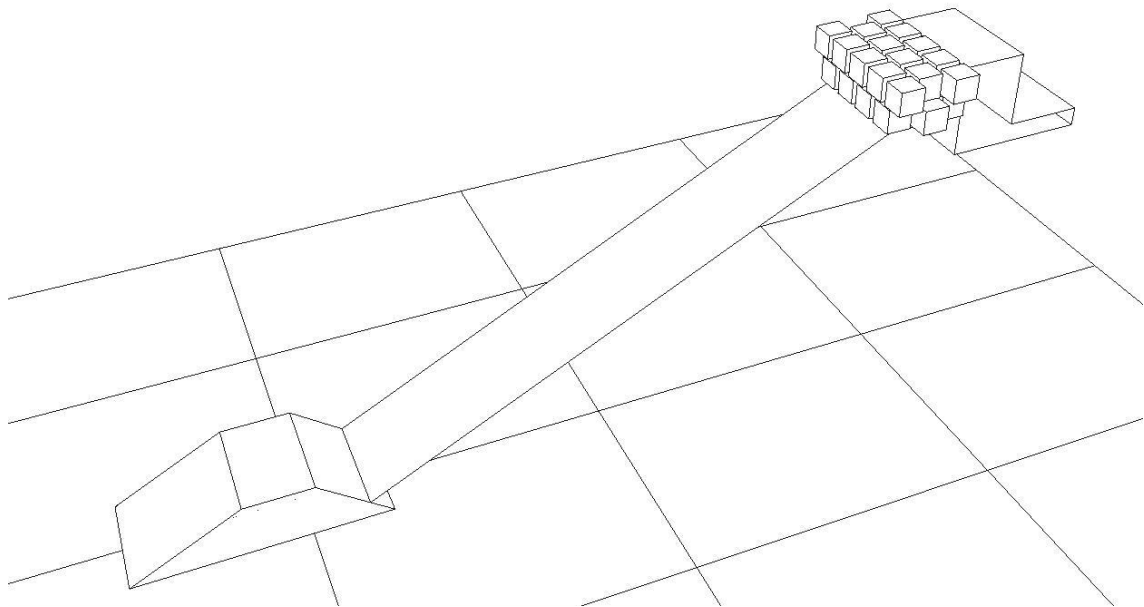


Figura 4.6. Superestructura de cubos.

Una vez terminada esta geometría, se podría proceder a lanzar los cubos. No obstante, esta forma de proceder da resultados muy negativos y muy poco realistas en la colocación final de los cubos. Esto es así porque la capa inferior de los cubos lanzados se encuentra con el fondo liso del talud, con lo que la casi totalidad de esos cubos se colocarán de forma paralela al plano del talud y con escasísima separación entre ellos. Estos mismos cubos crearán, a su vez, una especie de segundo plano para la segunda capa de cubos, con lo que el fenómeno se volverá a repetir y lo mismo ocurrirá para la tercera capa. En la siguiente figura se aprecia este fenómeno.

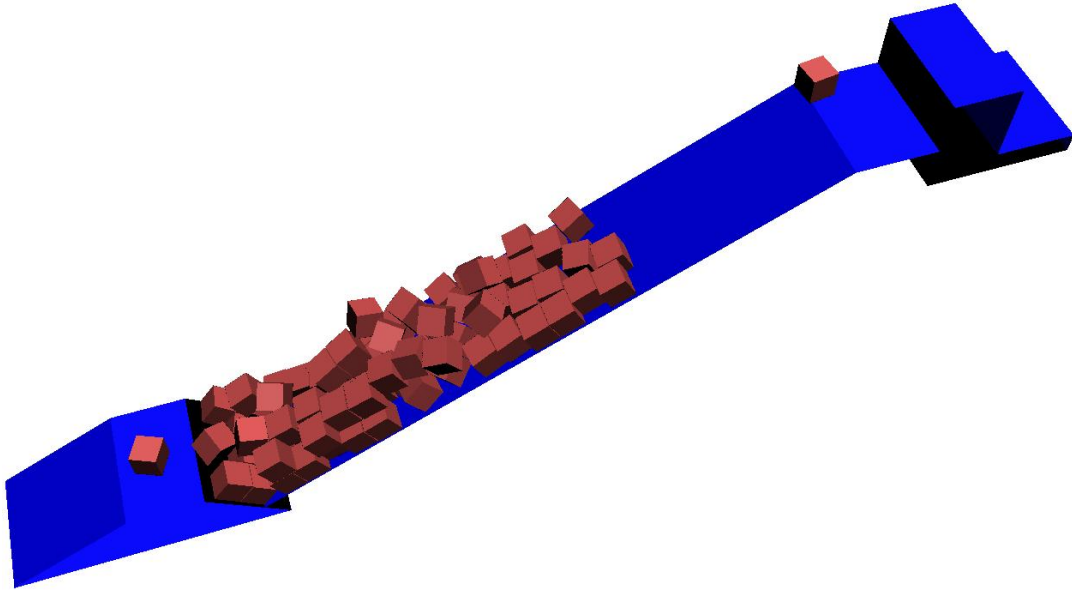


Figura 4.7. Resultados negativos previos en la colocación de los cubos.

Una posible solución al problema anterior es la simulación de la rugosidad y aleatoriedad de la nivelación del terreno del talud bajo los cubos que se van a colocar mediante la construcción de la cara externa de la subcapa inferior de cubos, más pequeños. Para ello se dibuja una matriz de cubos cuyos centroides estarán contenidos en el plano del talud que, pese a estar colocados de forma regular, servirán perfectamente para que los cubos que se coloquen encima queden de forma aleatoria, girados y con una separación correcta, a diferencia del caso anterior, en el que aparecían colocados de forma compacta y paralelos al plano del talud. Se pasa a diseñar entonces la subcapa de cubos. Dibujamos entonces un único cubo a partir del cual se construirá la matriz necesaria de cubos.

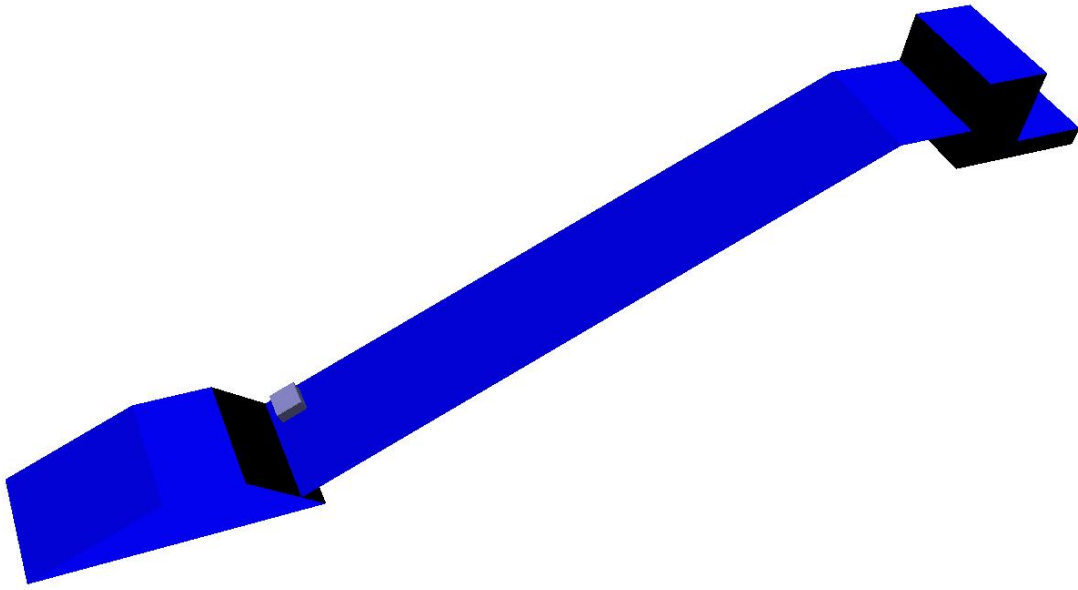


Figura 4.8. Cubo inicial a clonar.

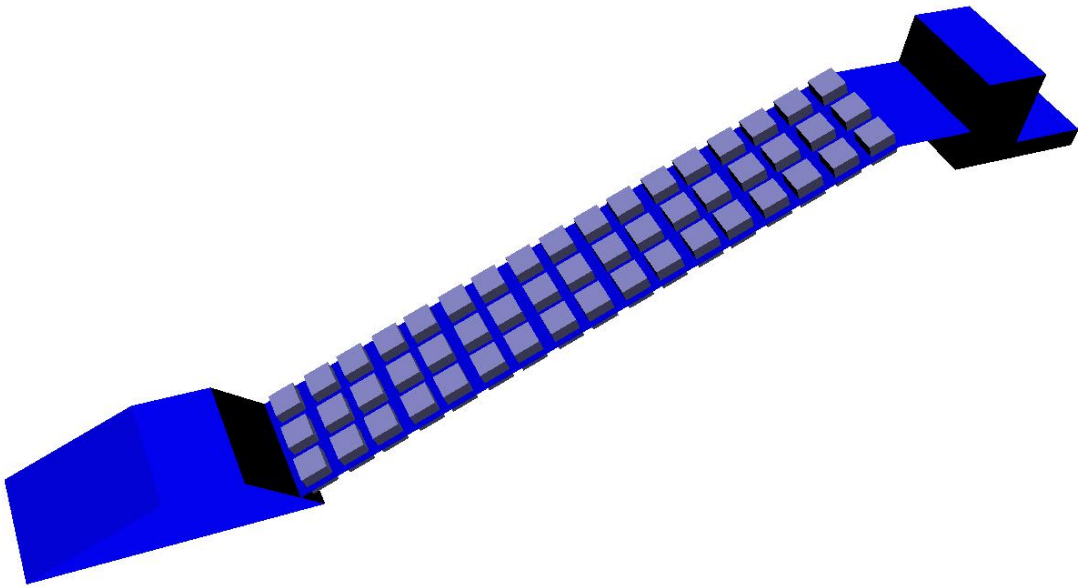


Figura 4.9. Matriz de subcapa de cubos.

Obviamente, la mitad de los cubos que queda por debajo del plano del talud no nos va a ser de ninguna utilidad una vez tengamos que construir la geometría definitiva a mallar. En la siguiente figura se aprecia la geometría de los cubos que habrá que eliminar:

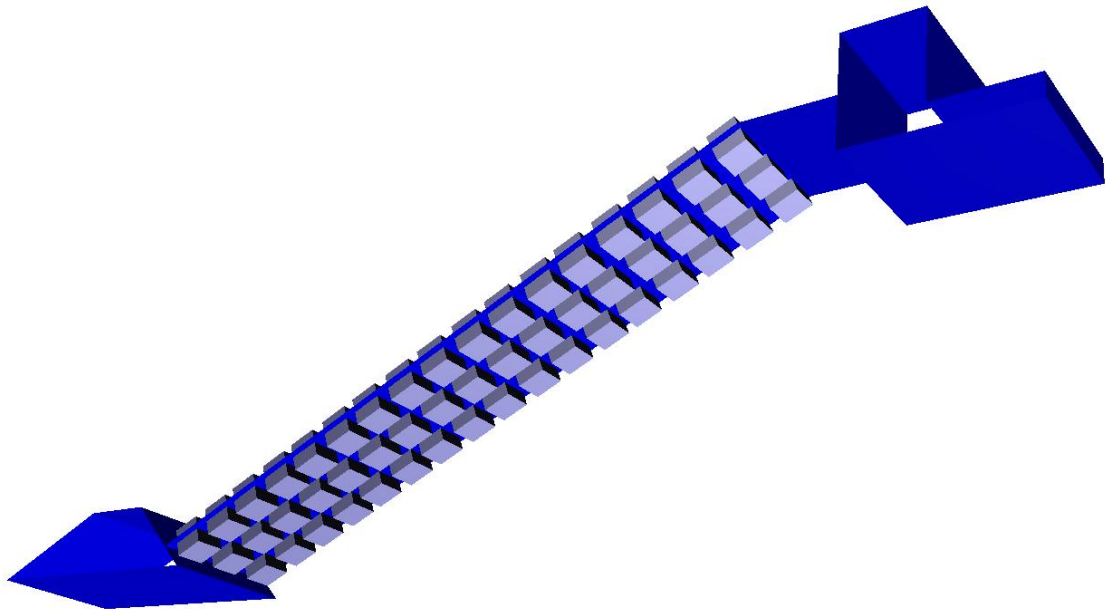


Figura 4.10. Vista de la cara inferior del talud.

Una vez terminada la geometría anterior, se puede proceder ya a lanzar los cubos. Se dibuja entonces un cubo de 4 metros de lado que será clonado un número de veces igual a la cantidad de cubos que consideremos necesarios para la construcción de la sección de dique. Se diseña entonces, para empezar, una matriz tridimensional de cubos de dimensiones $2 \times 3 \times 15$ para un total de 90 cubos. Estos cubos se han de situar de forma que, al soltarlos sobre el talud, se coloquen, por efecto de la gravedad, de forma apropiada y realista.

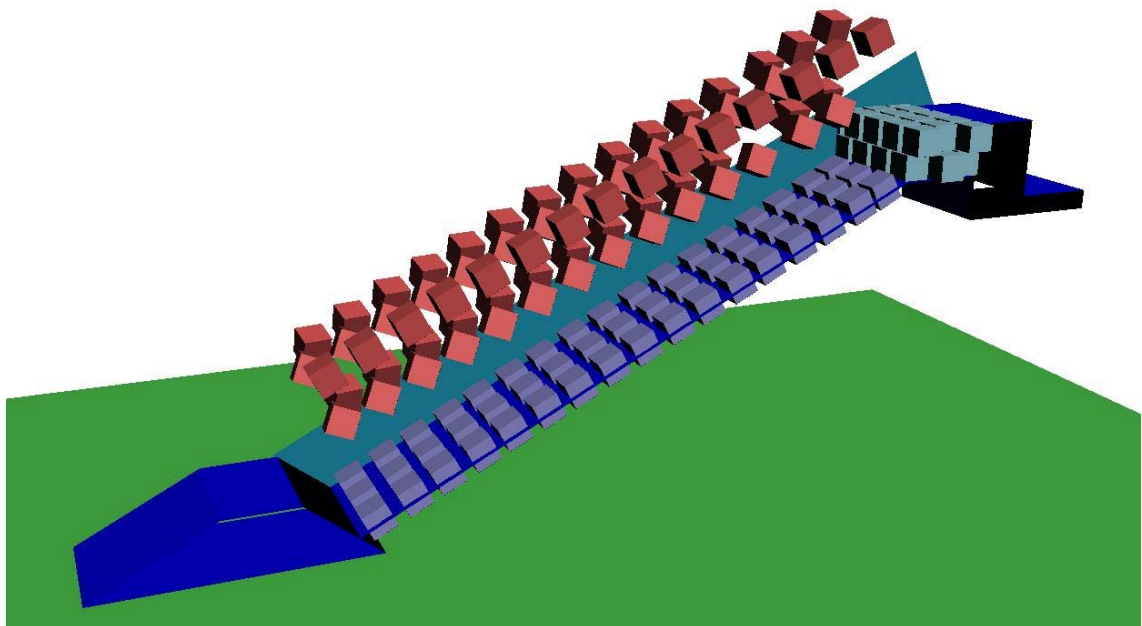


Figura 4.11. Matriz rectangular de cubos.

Utilizamos ahora sí el programa de cálculo de dinámica de sólidos rígidos y observamos que los primeros resultados no son satisfactorios. Debido al efecto de la gravedad, los cubos tienen tendencia a descender progresivamente hacia el pie del dique, acumulándose entonces abajo y quedando vacía la parte superior. Hay que seguir probando con diferentes configuraciones iniciales de lanzamiento de los cubos y con las múltiples variables con las que trabaja el programa. En este caso un parámetro fundamental es la cantidad de cubos lanzados y el rozamiento entre los mismos.

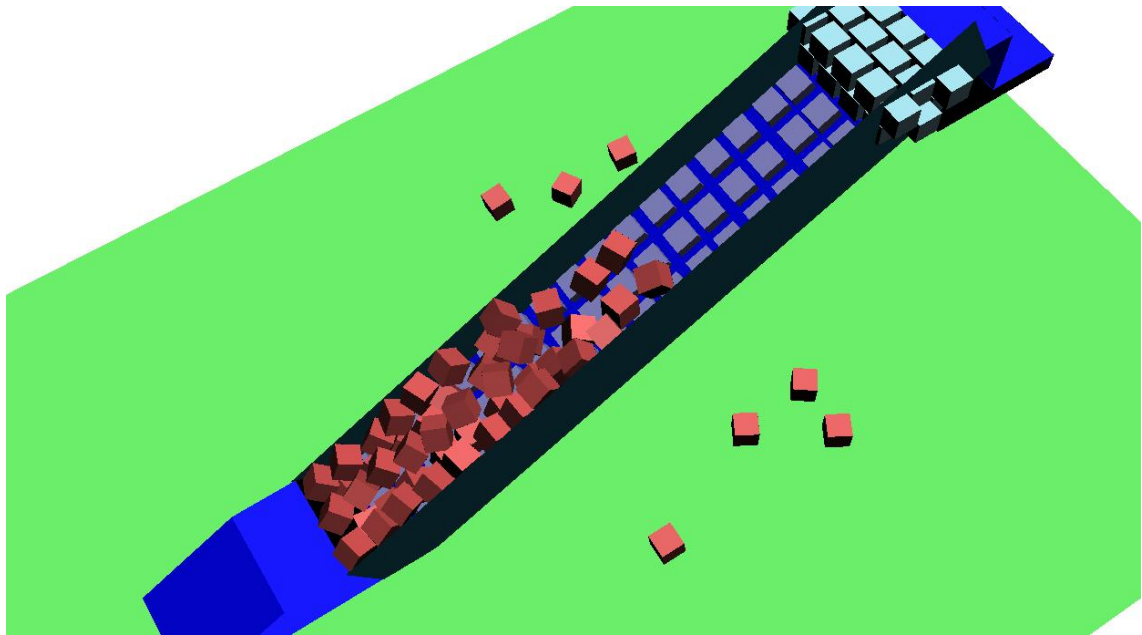


Figura 4.12. Resultado no satisfactorio tras lanzar los cubos.

Añadimos entonces una pequeña matriz de cubos adicional sobre la coronación del dique para ser lanzada junto al cuerpo de cubos principal. Tras múltiples intentos, se obtiene una correcta colocación de los cubos.

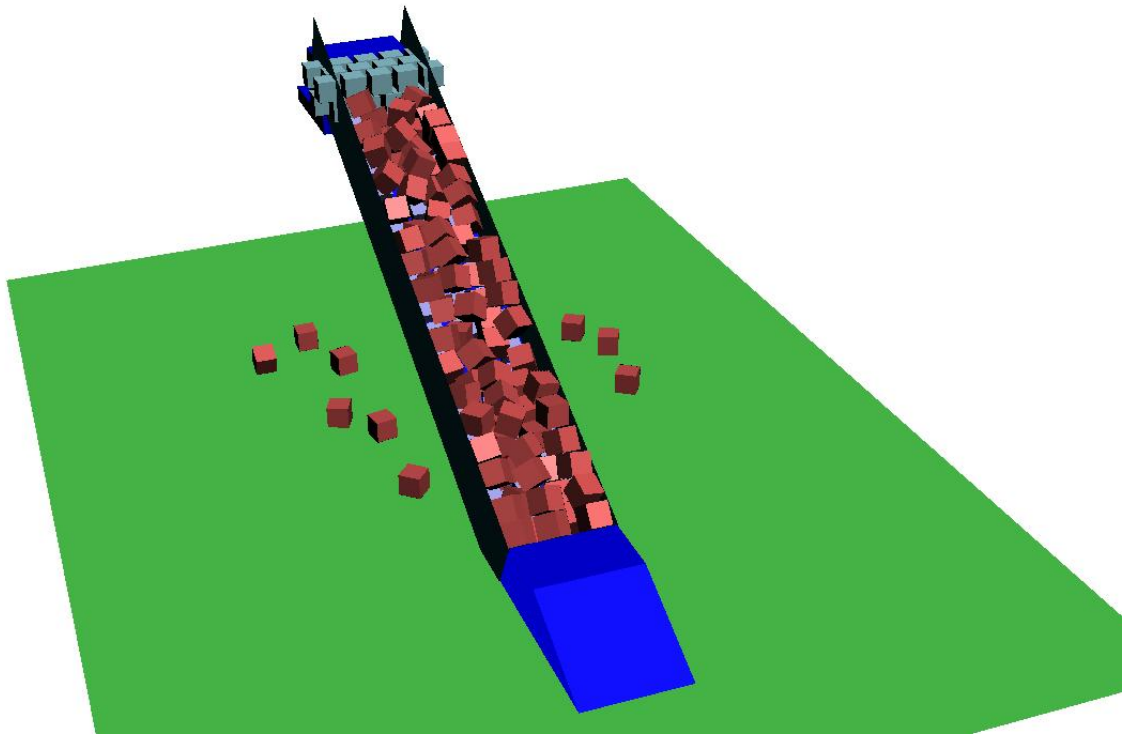


Figura 4.13. Resultado satisfactorio obtenido tras lanzar los cubos.

Una vez eliminados los cubos sobrantes, disponemos ya del diseño básico del dique. Ahora hace falta construir el canal de ensayo, sus paredes, la pala y las masas de agua. Todo ello nos hará falta a la hora de lanzar el caso con PFEM.

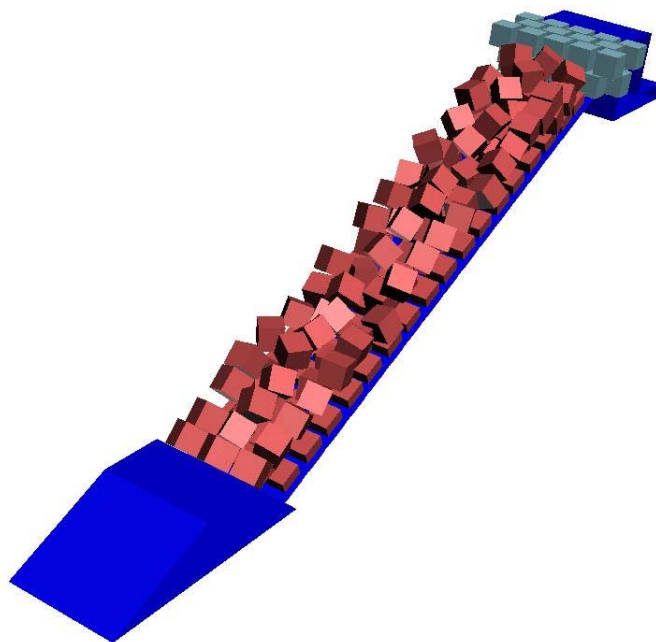


Figura 4.14. Configuración final de los cubos.

Antes de ello, no obstante, hace falta dejar listo el talud. Hay que recordar que aún conservamos la geometría completa de la subcapa de cubos situados en el plano del talud. Hay que eliminar la mitad que sobresale por debajo de este plano, ya que no nos va a ser de ninguna utilidad para el cálculo del problema.

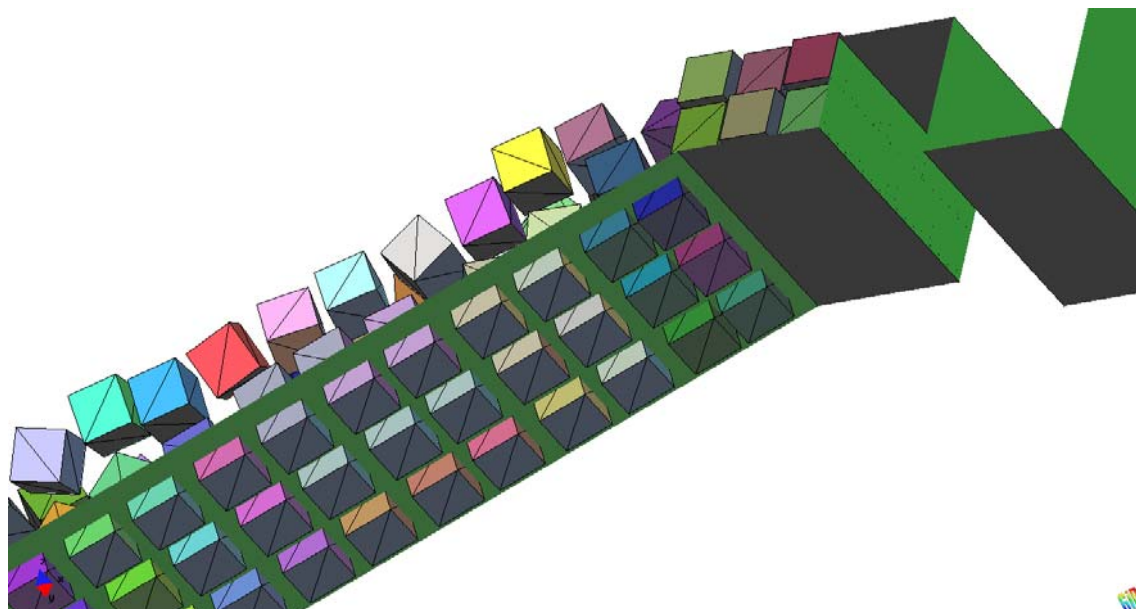


Figura 4.15. Mitad inferior de los cubos que hay que eliminar

Para suprimir la mitad de los cubos que sobresalen por debajo, hacemos la intersección del plano de talud con los cubos. Una vez obtenida, se procede entonces a eliminar las geometrías sobrantes.

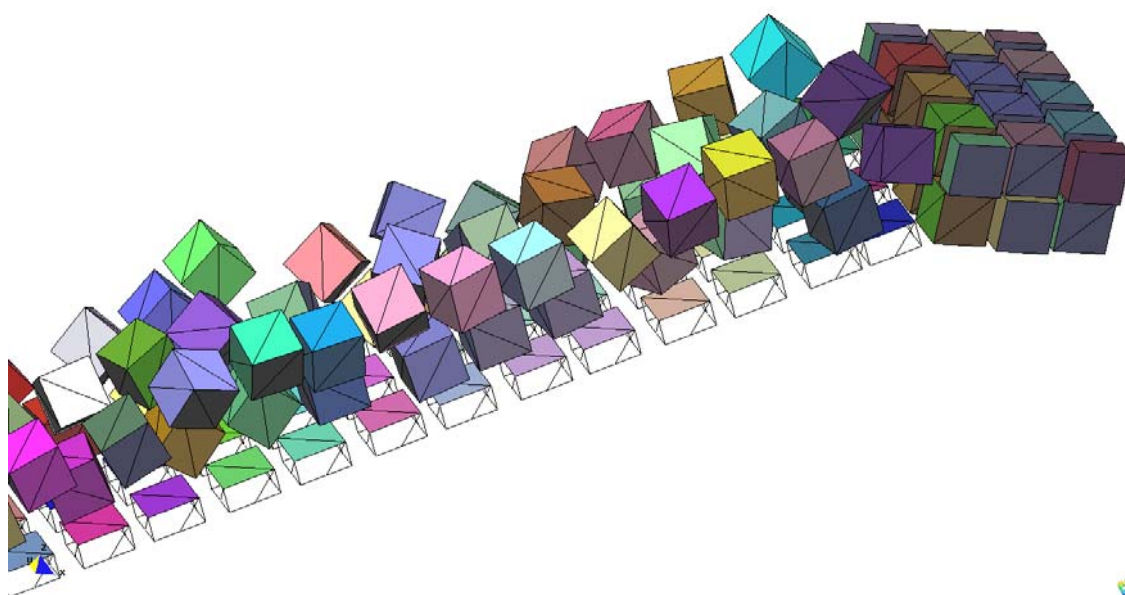


Figura 4.16. Borrado de la geometría correspondiente de los cubos.

Una vez realizado el trabajo, el talud efectivo resultante estará formado por el plano original convenientemente agujereado debido a la intersección con la geometría de los cubos al que se le unirá el conjunto de la superficie de semicubos que hemos obtenido. En las dos figuras que aparecen a continuación queda reflejado el proceso.

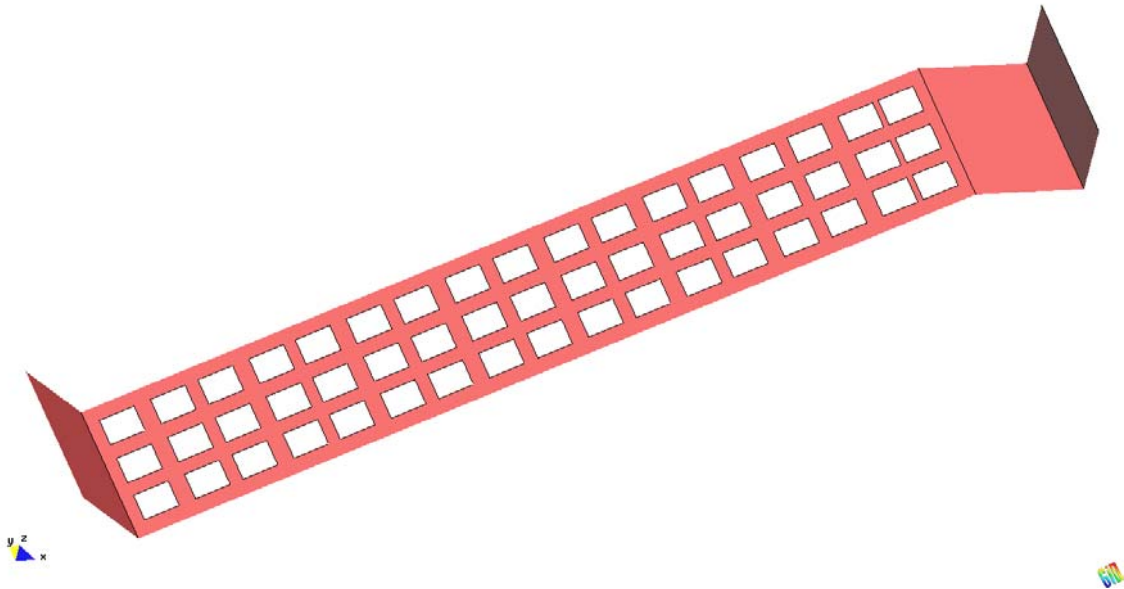


Figura 4.17. Superficie agujereada.

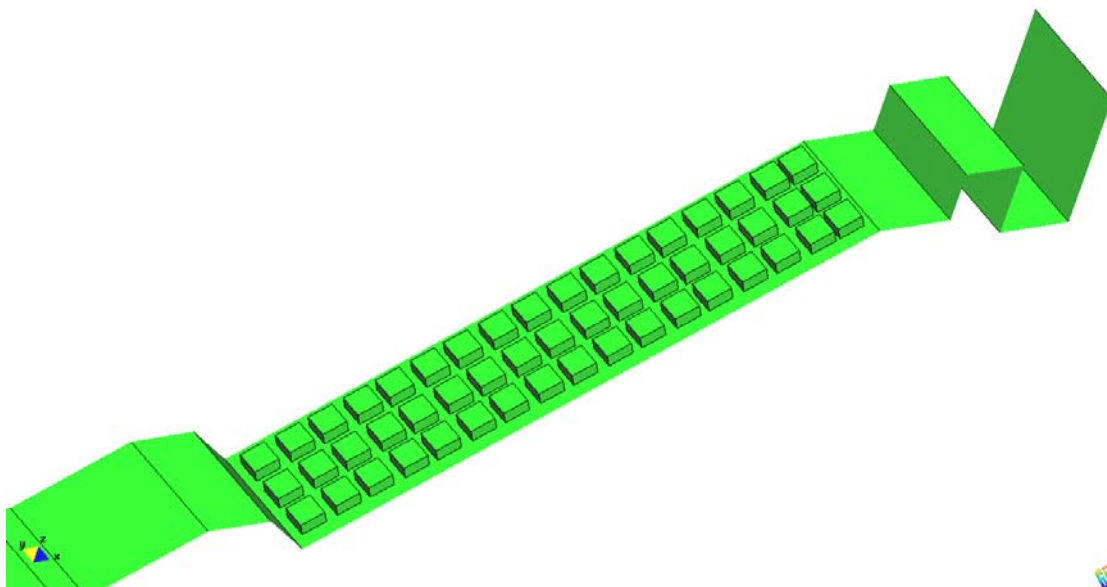


Figura 4.18. Superficie completada.

Se dibuja ahora el canal de ensayo. Este canal de ser de longitud tal que la pala generadora sea capaz de producir un oleaje totalmente desarrollado. Se decide construir el

canal con una longitud desde el pie de dique de 150 metros. El aspecto del conjunto dique-canal resulta el siguiente:

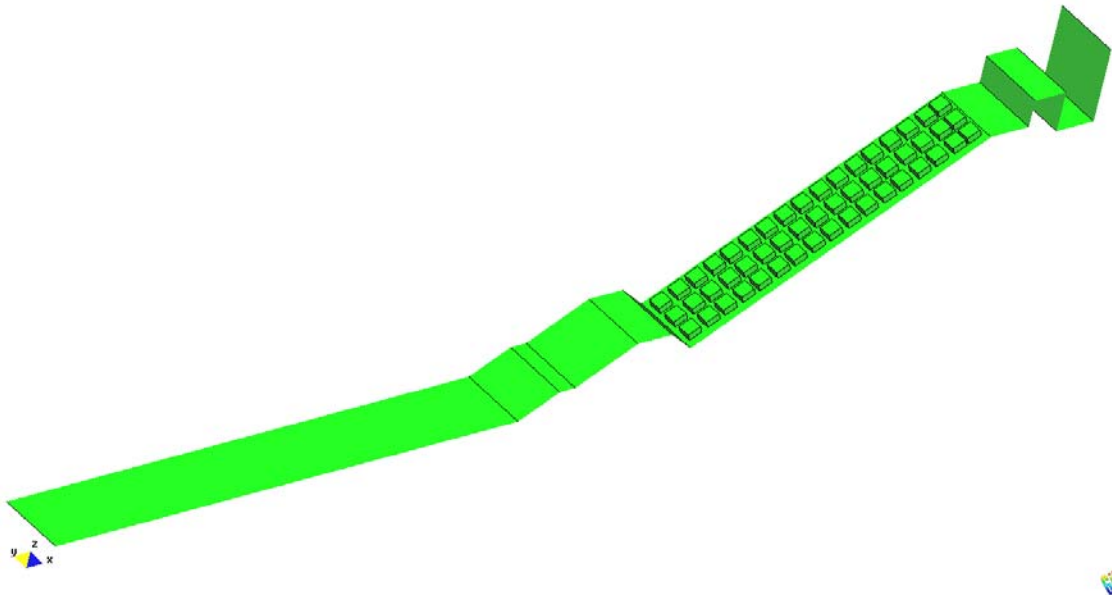


Figura 4.19. Geometría del conjunto dique-canal de ensayo.

Construimos ahora las paredes laterales y la pala generadora de oleaje. Se decide que las paredes tengan una altura por encima de la coronación del dique igual a 20 metros para que éstas puedan contener las variaciones del nivel de agua provocadas por el oleaje generado. La pala tendrá una altura igual a la de las paredes y para la generación de las olas realizará un movimiento rotacional respecto al eje fijo resultante de la intersección entre los planos de la pala y el del fondo del mar.

Dibujamos entonces las paredes laterales y aprovechamos para refinar la geometría de la coronación del dique. Para ello, se intersectan los planos verticales creados, con los cubos de la superestructura. Se elimina la geometría de los cubos sobrante, es decir, aquella que sobresale por la cara externa de las paredes verticales. En las dos figuras siguientes se detalla el procedimiento.

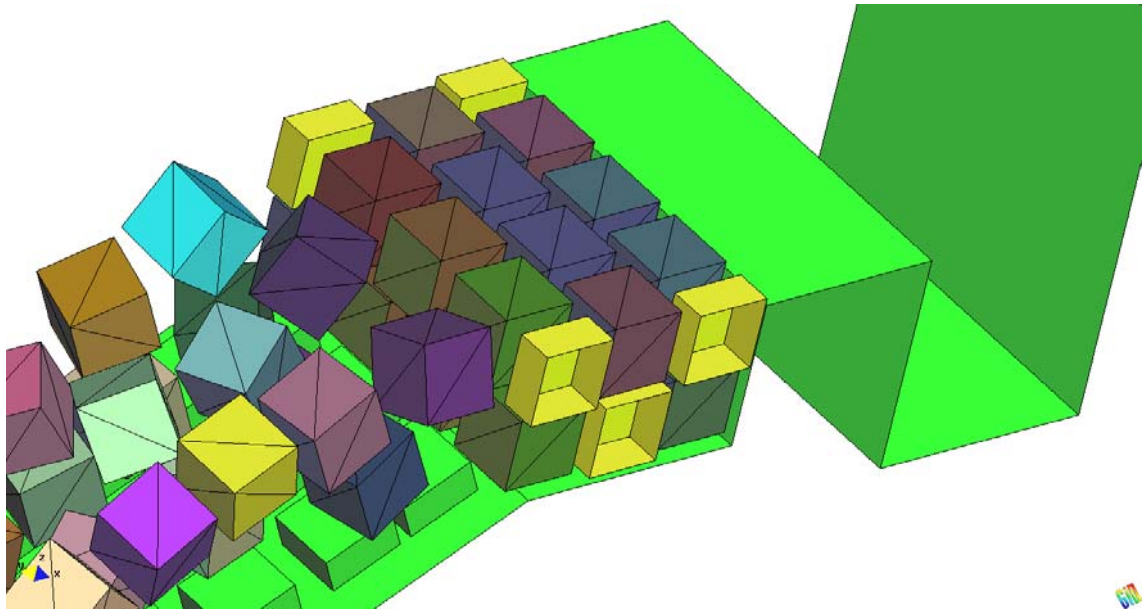


Figura 4.20. Eliminación de la geometría sobrante.

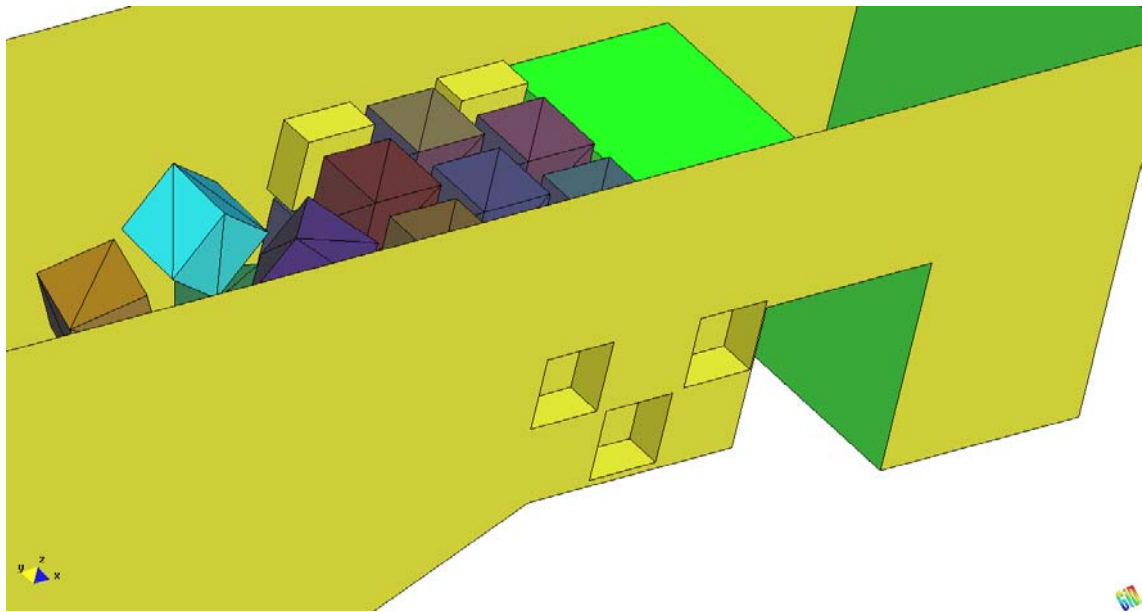


Figura 4.21. Creación de las paredes laterales.

Una vez añadidas las paredes y la pala se obtiene la geometría de la figura siguiente:

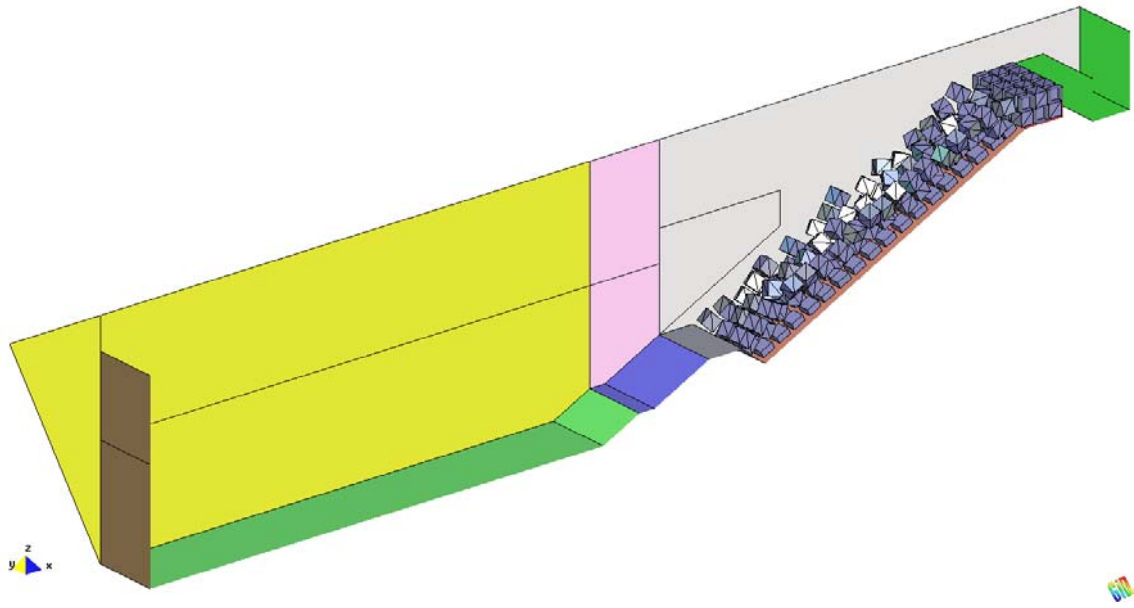


Figura 4.22. Geometría con las paredes y la pala.

Finalmente dibujamos la masa de agua. Se trata de un volumen de agua que se va a mallar, por lo tanto se decide dividirlo en tres partes para reducir el tiempo de cálculo con PFEM. La malla resultante pasará de ser más gruesa al lado de la pala a más fina en la zona del dique, donde se desea obtener más detalle de cálculo. La altura de lámina de agua es la indicada en los planos originales de CAD. El volumen de agua correspondiente a la zona de cubos no se generará envolviendo simplemente los cubos y llenando los vacíos, ya que el volumen de agua sería excesivamente complicado, lleno de huecos, y podría haber problemas a la hora de mallar el volumen. Por lo tanto, se decide diseñar un volumen equivalente al agujereado pero separado del dique. Aparte de ser un diseño mucho más inmediato y fácil de mallar, se crea una corriente inicial hacia el dique que aporta una cierta aleatoriedad al comportamiento del oleaje en las proximidades del dique.

Tras dibujar las masas de agua, el diseño es el siguiente:

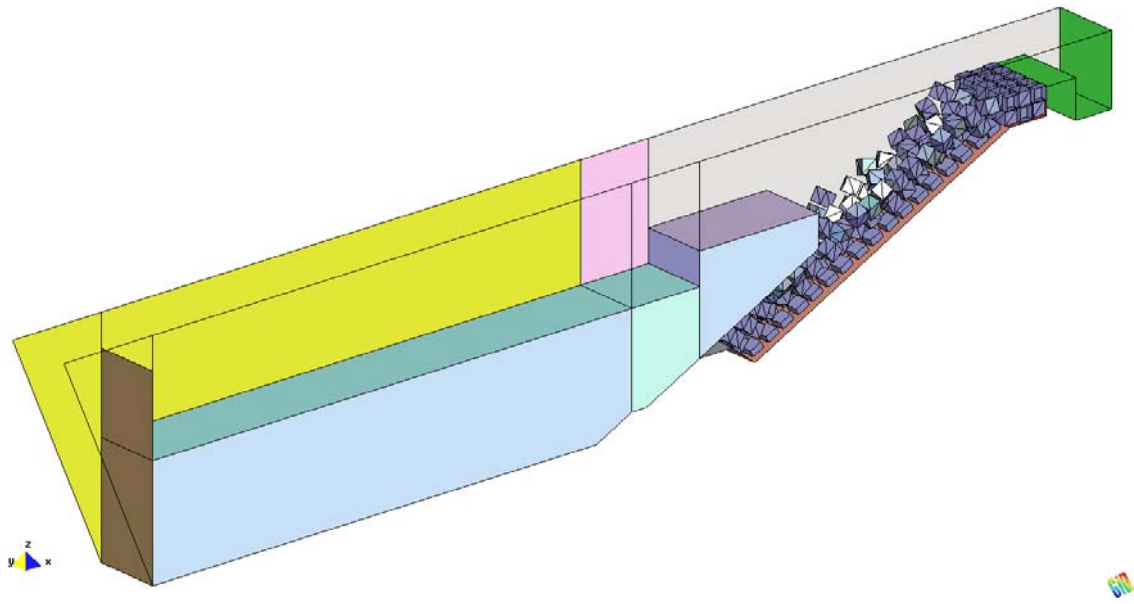


Figura 4.23. Geometría definitiva.

Para acabar, en la siguiente figura se puede apreciar los tres diferentes tamaños de malla según las distintas zonas. En el detalle aparecen la parte superior de las paredes, pero el malla es idéntico para sus correspondientes masas de agua.

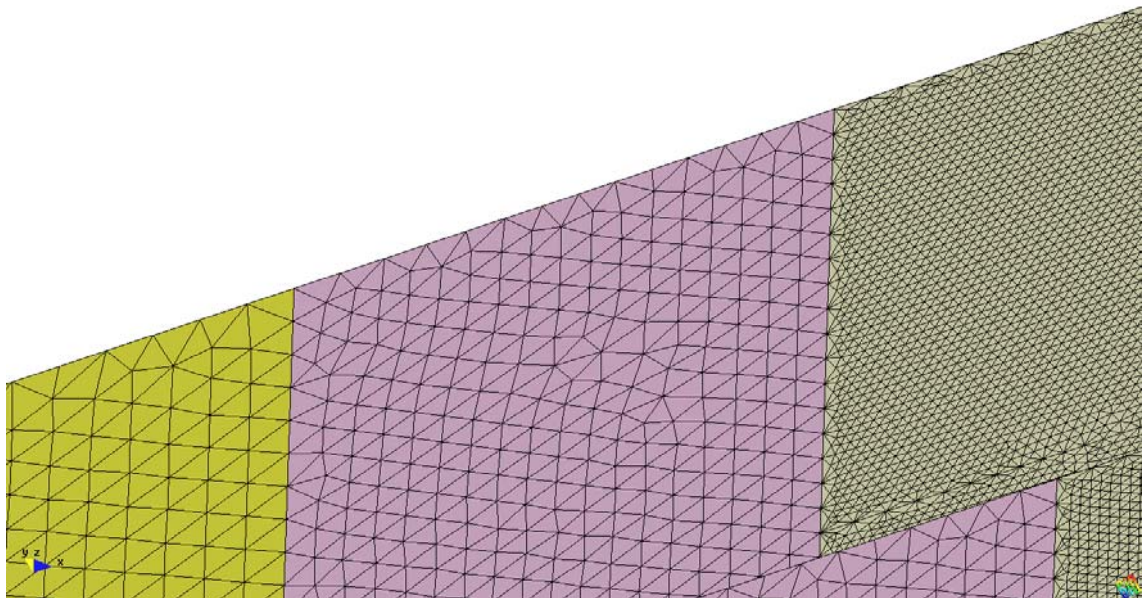


Figura 4.24. Detalle de los tamaños de malla.

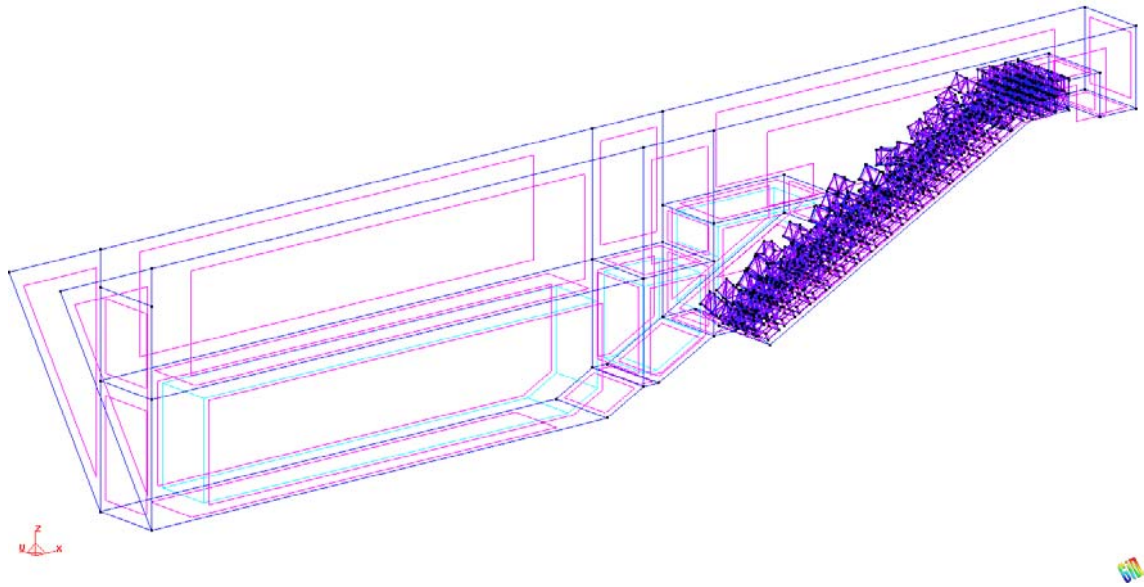


Figura 4.25. Geometría finalizada del caso “dique completo”.

Construcción de los datos para el estudio de un “minidique”

La geometría del caso minidique no es más que una simplificación de la del dique completo. Su utilidad es clara: la posibilidad de realizar cálculos más rápidos con PFEM y obtener y analizar primeros resultados. La anchura de la sección será la misma, pero reducimos la altura del dique a aproximadamente un tercio de la original. Lógicamente se reducirá también la longitud del canal de ensayo y del calado de agua.

Partimos de la geometría terminada del dique completo. Empezamos entonces eliminando todos los cubos en exceso de la sección original:

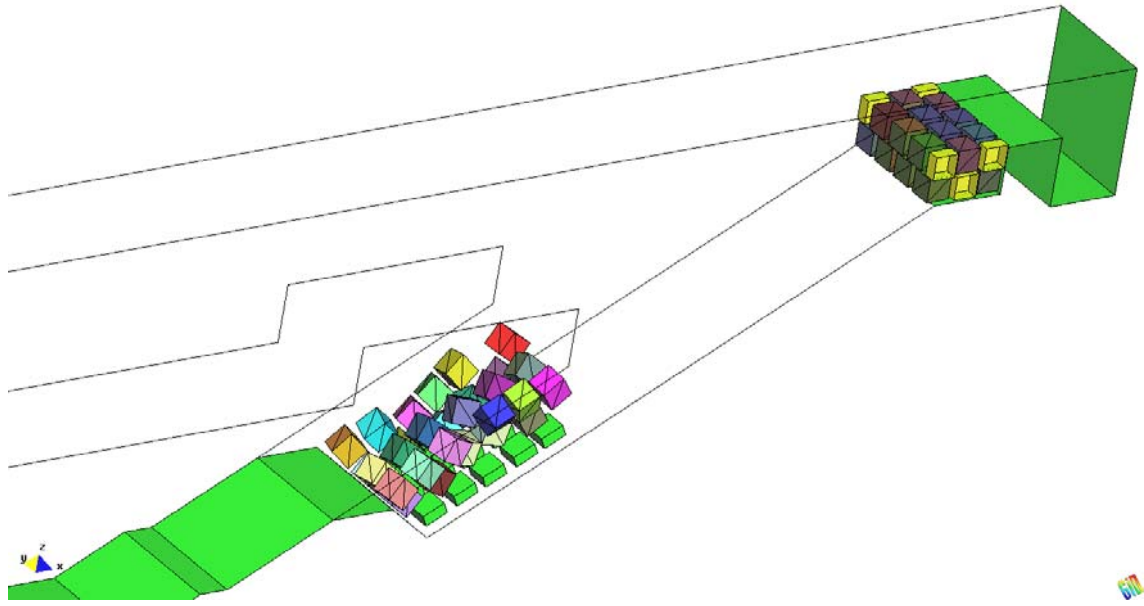


Figura 4.26. Eliminación de los correspondientes cubos.

Una vez suprimidos los cubos apropiados, movemos la coronación del dique a la nueva ubicación:

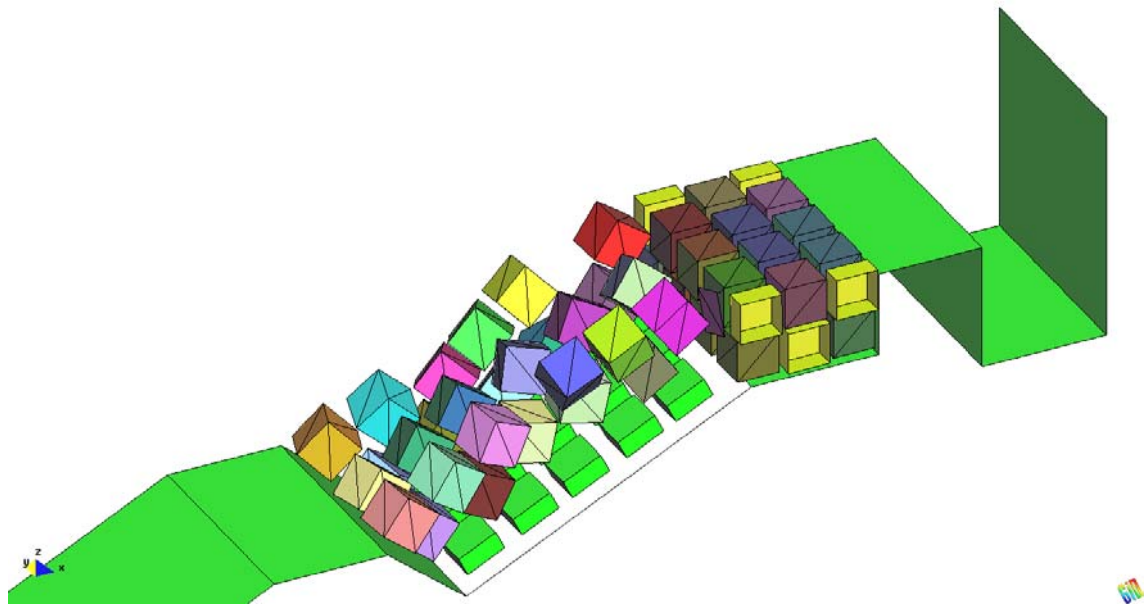


Figura 4.27. Nueva ubicación de la coronación del minidique.

Construimos el nuevo plano de talud:

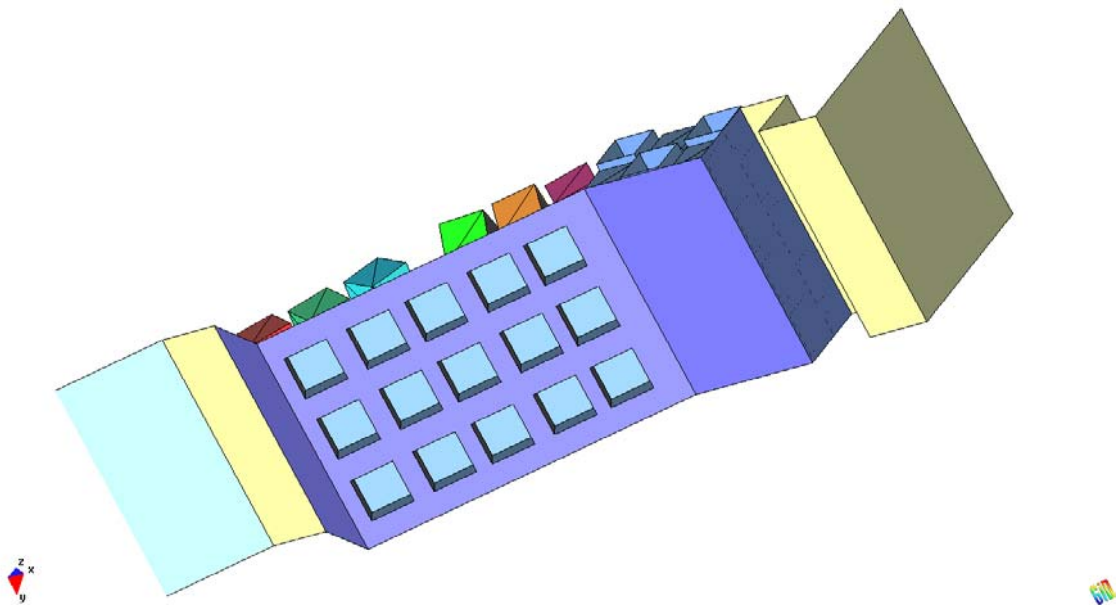


Figura 4.28. Cara inferior del plano del talud.

Diseñamos el nuevo canal y sus correspondientes paredes y pala:

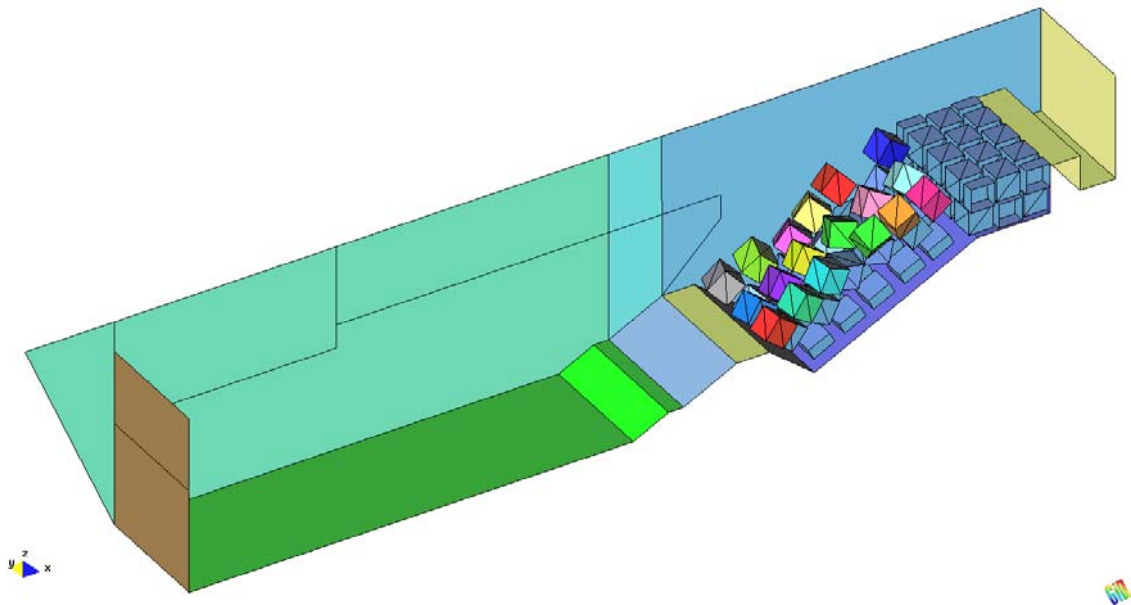


Figura 4.29. Nueva geometría a falta de la masa de agua.

Finalmente construimos las correspondientes masas de agua de forma análoga al caso anterior:

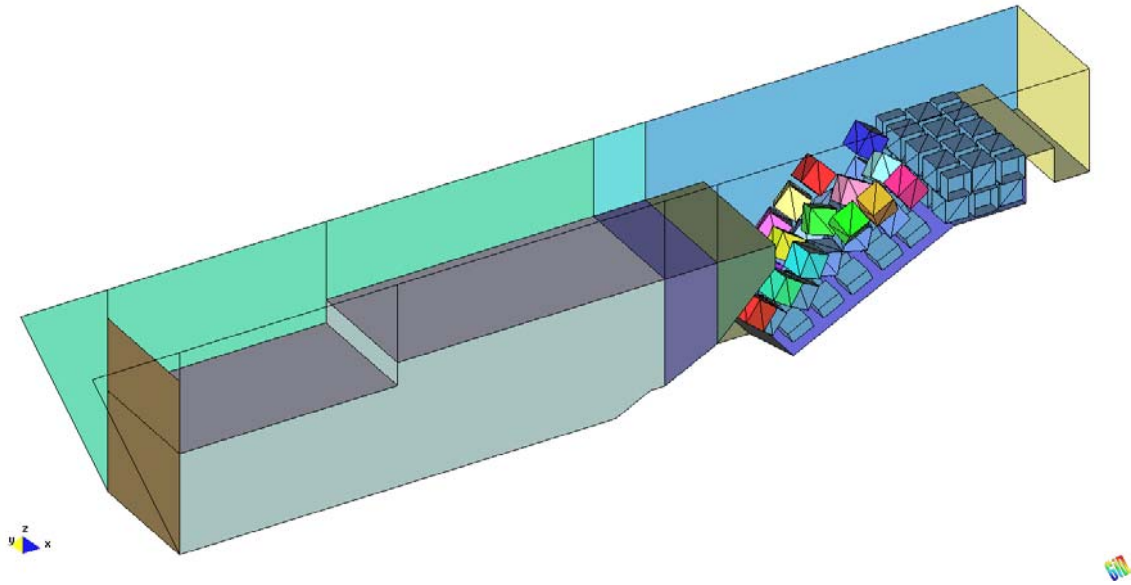


Figura 4.30. Geometría de minidique finalizada.

En las figuras siguientes se muestran resultados de aplicación del PFEM al estudio del efecto de olas sobre un manto de bloque y al cálculo del efecto del rebase sobre un camión ubicado en las proximidades del dique.

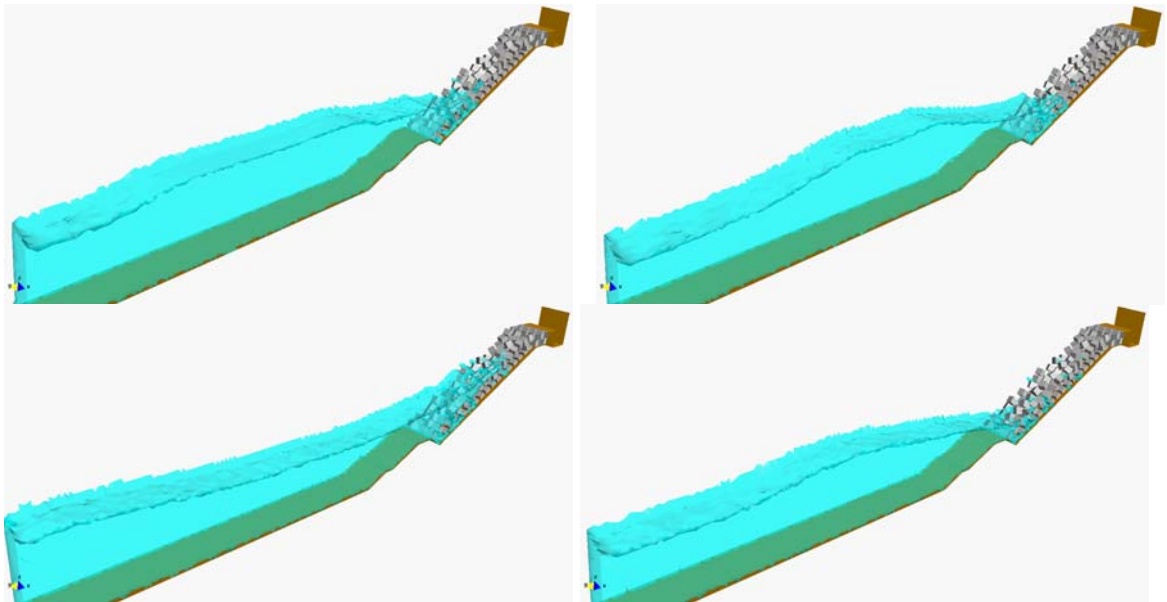


Figura 4.31a. Primeras aplicaciones del impacto de trenes de olas sobre diques de bloques

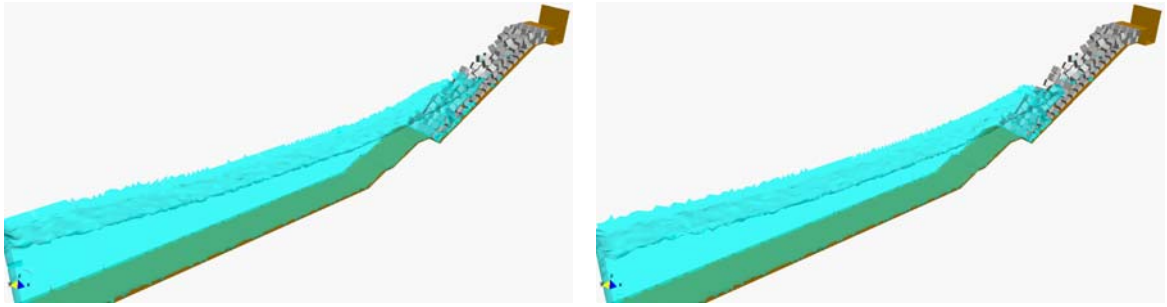
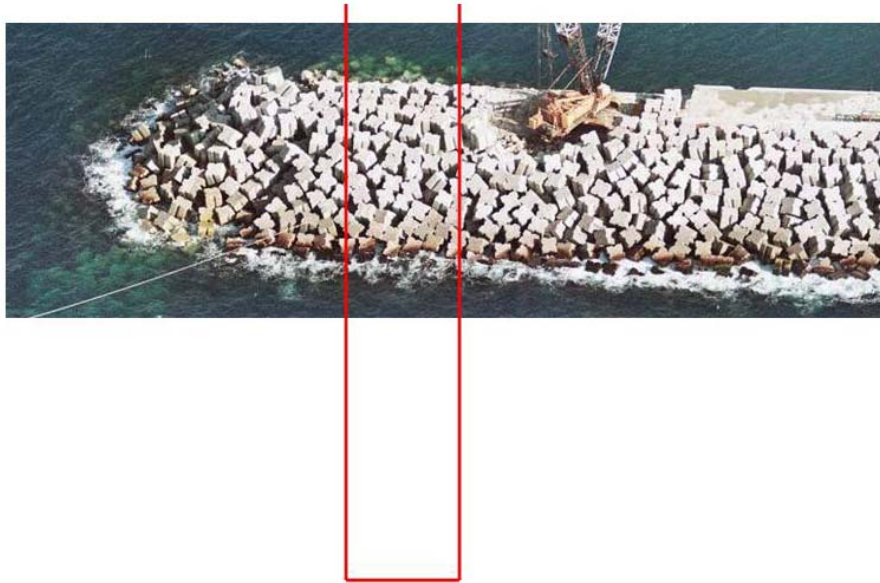
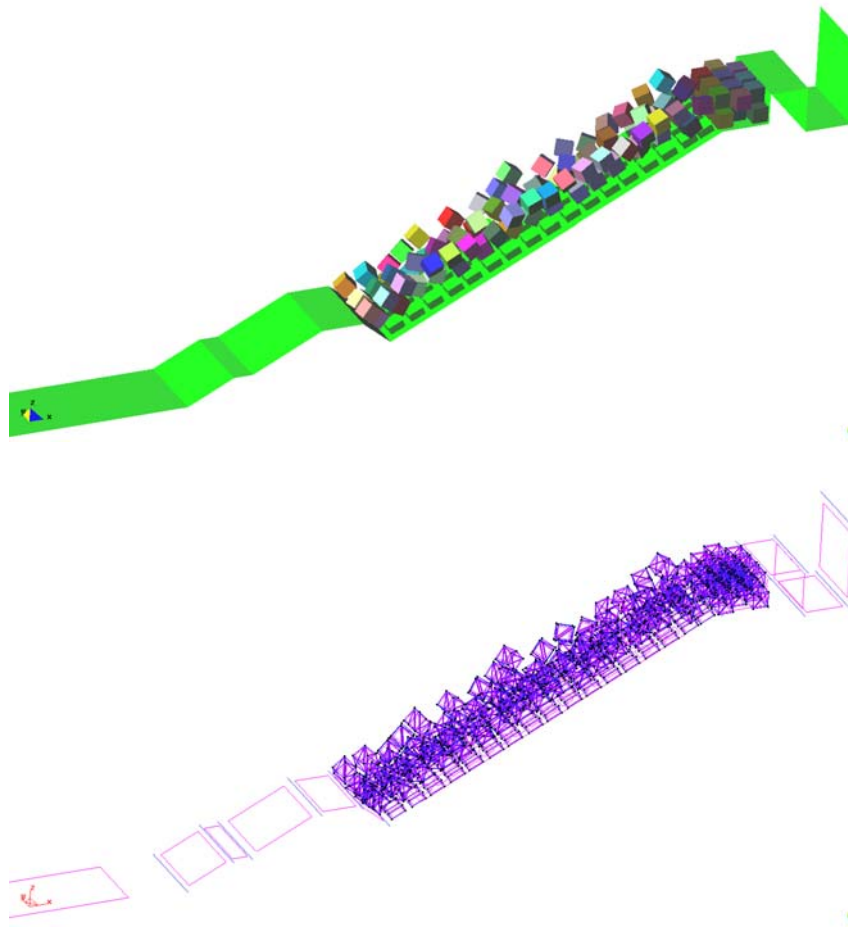


Figura 4.31b. Primeras aplicaciones del impacto de trenes de olas sobre diques de bloques (continuación)

En la Figura 4.32 se muestra una imagen de la zona de estudio del dique seleccionado para aplicación de los métodos de cálculo desarrollados. Se muestra la definición geométrica de un conjunto de bloques de hormigón de $4 \times 4 \times 4 \text{ m}^3$ (150Tn). Esta información es esencial para la posterior discretización de dichos bloques en elementos finitos.



(a)



(b)

Figura 4.32. (a) Visión general del dique escogido. (b) Definición geométrica del conjunto de bloques del manto para la posterior discretización por elementos finitos.

La Figura 4.33 muestra ejemplos de las primeras simulaciones del impacto de una ola sobre el talud y los bloques. En la Figura 4.34 se muestra un estudio similar utilizando una sección con menos bloques.

En la Figura 4.35 se muestra detalle de la malla que discretiza el mar y los bloques en un cierto instante.

En la actualidad se trabaja en la definición de un dominio “esviado” para poder realizar simulaciones del impacto del oleaje oblicuo sobre el talud. Se dispone ya de una metodología para la definición de dicho dominio y se están realizando los primeros cálculos en un primer dominio de prueba. En el Apartado 4.2 se explican las bases de la metodología para el análisis de trenes de olas oblicuos y se presenta un primer ejemplo de aplicación.

Se resalta que en todos los casos se permite el movimiento relativo entre los bloques, lo que permite evaluar las fuerzas de interacción entre bloques, así como entre los bloques y el agua del mar durante el impacto del oleaje.

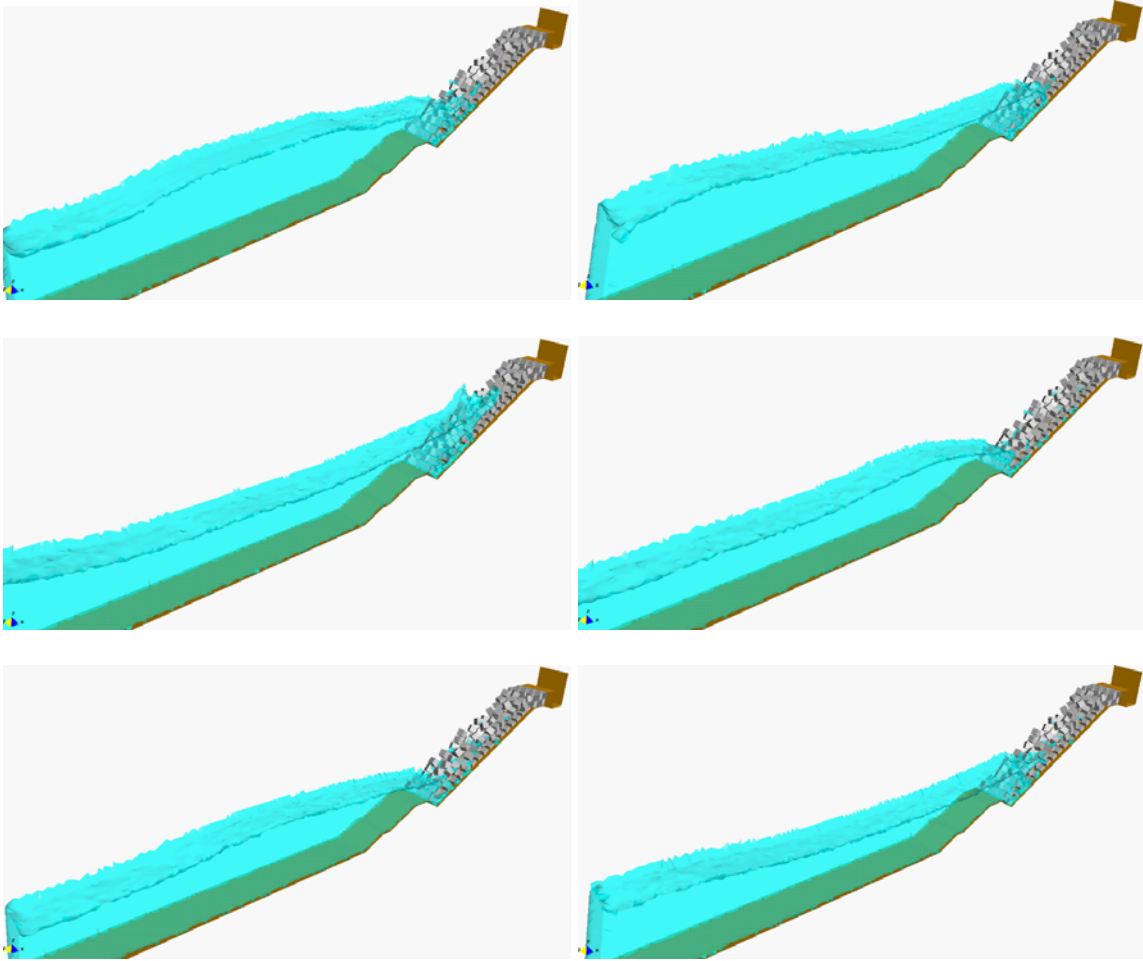


Figura 4.33. Resultados del estudio del impacto del oleaje sobre los bloques utilizando el PFEM.

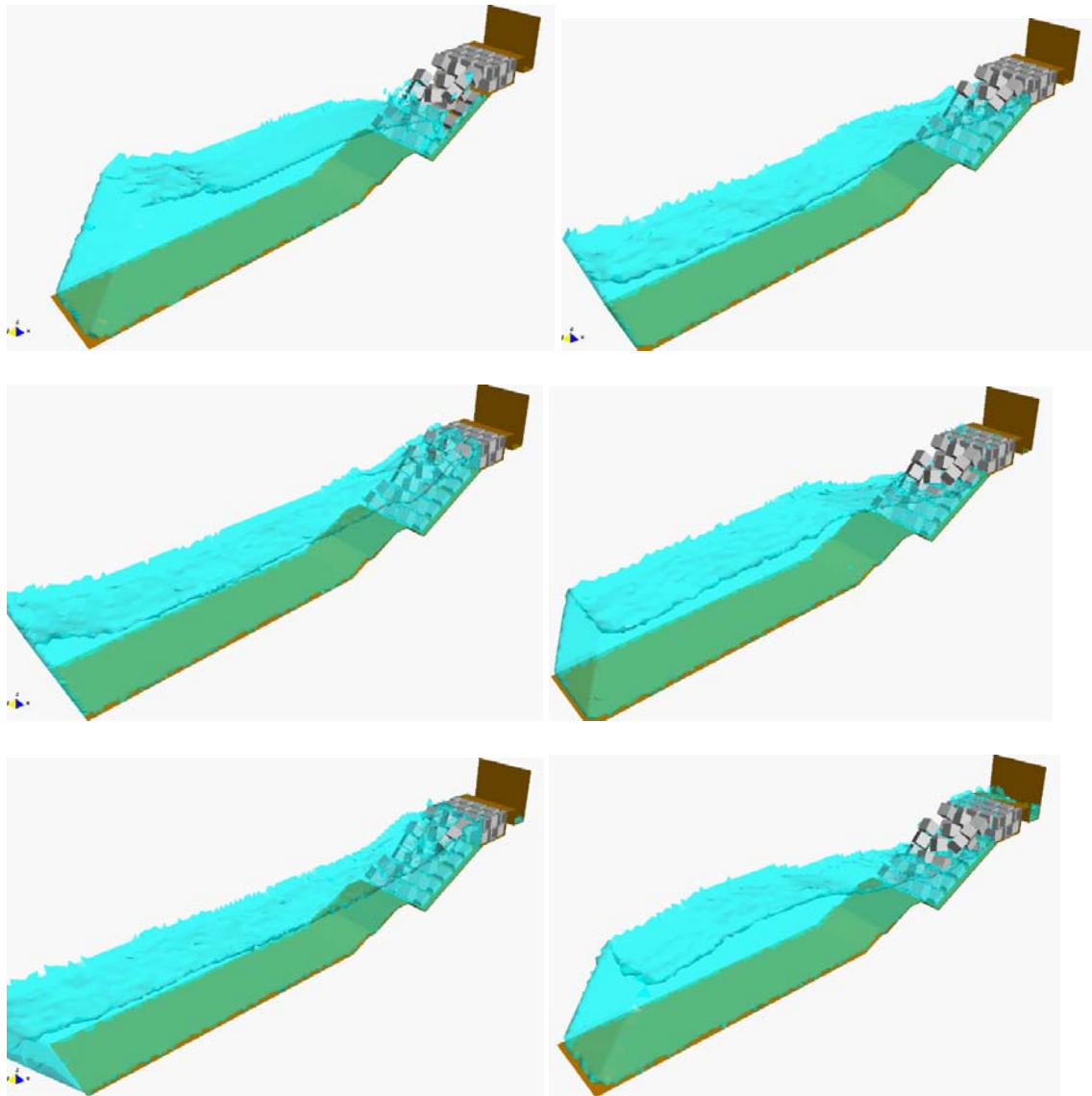


Figura 4.34. Resultados del estudio del oleaje sobre una sección del dique con número de bloques.

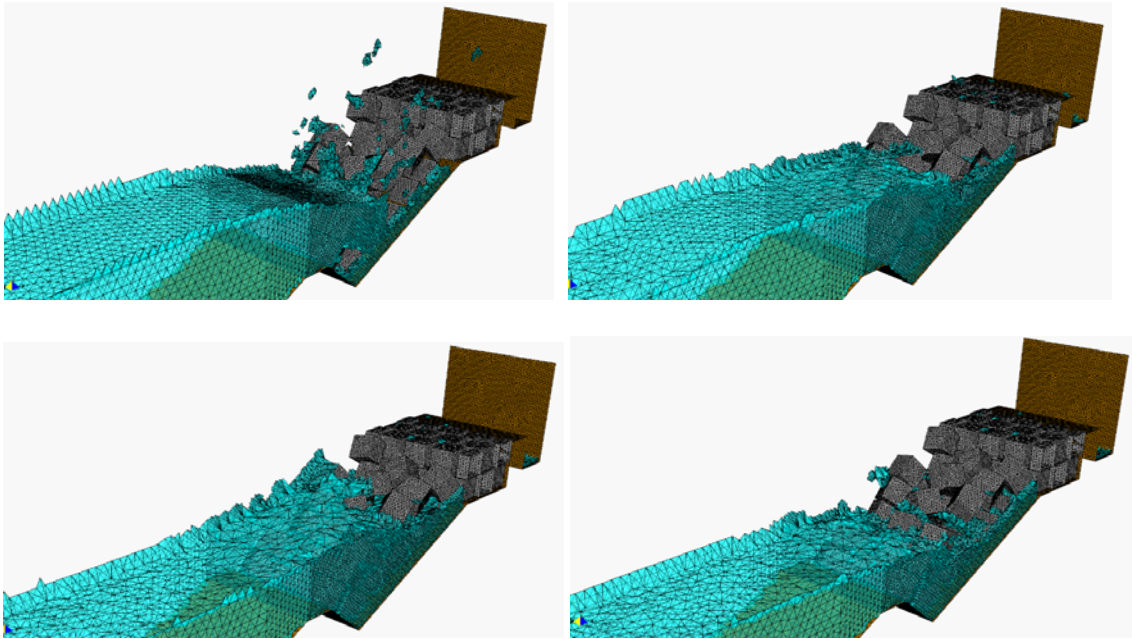


Figura 4.35. Detalle del estudio del impacto del oleaje sobre los bloques del manto utilizando el PFEM.

4.2 Estudio del caso oblicuo

4.2.1 Desarrollo de una metodología para estudio del oleaje oblicuo

El objetivo de esta tarea es estudiar el rebase producido por trenes de olas esviados en diques de bloques. Para ello se ha desarrollado una metodología innovadora para estudio del oleaje causado por trenes de olas oblicuos. A continuación se describen los aspectos esenciales de dicha metodología, a través de su aplicación a un caso concreto.

La metodología de cálculo se basa en la definición de una geometría en V formada por dos canales que se cortan en la sección de estudio. La sección de dique a diseñar es la habitual a la que se le añadirán generosos sobreeanchos a ambos lados para intentar captar con la máxima fiabilidad los fenómenos tridimensionales locales del oleaje como es, por ejemplo, la reflexión.

El primero de los dos canales servirá para lanzar un tren de olas a la sección a estudiar. El segundo canal presentará un fondo linealmente decreciente cuyo objetivo será disipar el oleaje reflejado y absorber así oleajes secundarios que puedan interferir en el resultado del método PFEM.

Las dimensiones del tramo a estudiar son las siguientes: 80 m. de longitud en la coronación del dique, 150 m. en el pie, 100 m. de anchura y 60 m. de alto. El calado del agua es de 35 metros. Se dibujarán además aproximadamente 1200 cubos de 4 m. de lado.

Partimos de la silueta original del caso dique completo, figura 4.36.

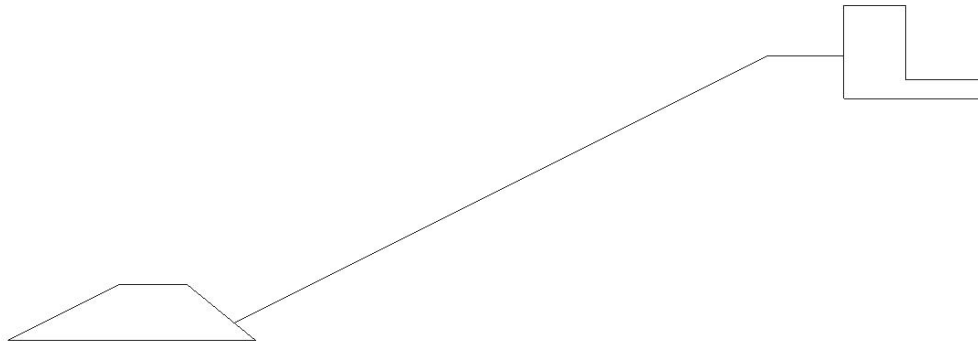


Figura 4.36. Perfil base del dique escogido.

Aplicamos una extrusión generosa, ya que esta vez el estudio del oleaje se va a hacer a lo largo de una zona mucho más amplia. Se extruye un total de 250 metros en la dirección perpendicular al plano de la sección (Figura 4.37).

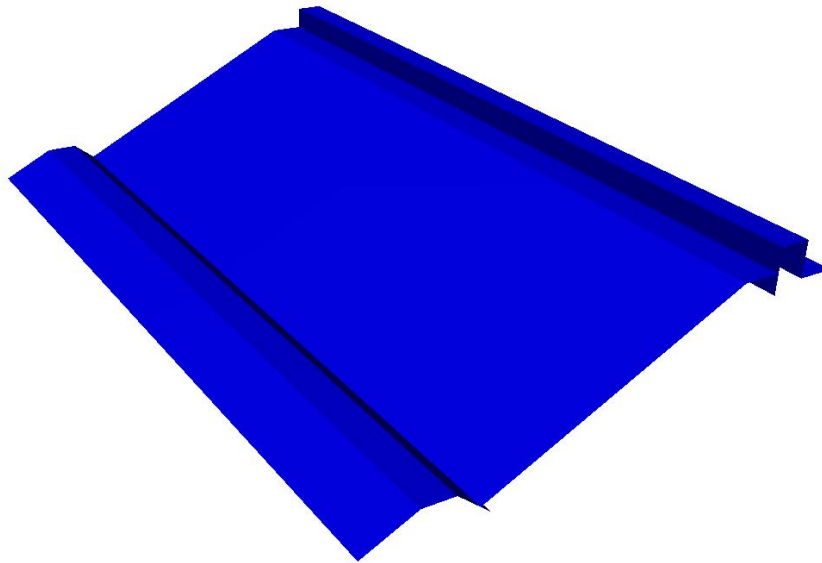


Figura 4.37. Perfil extrudido.

Construimos dos planos verticales externos provisionales y un plano horizontal que nos servirán para limitar el movimiento de los cubos tras ser lanzados (Figura 4.38):

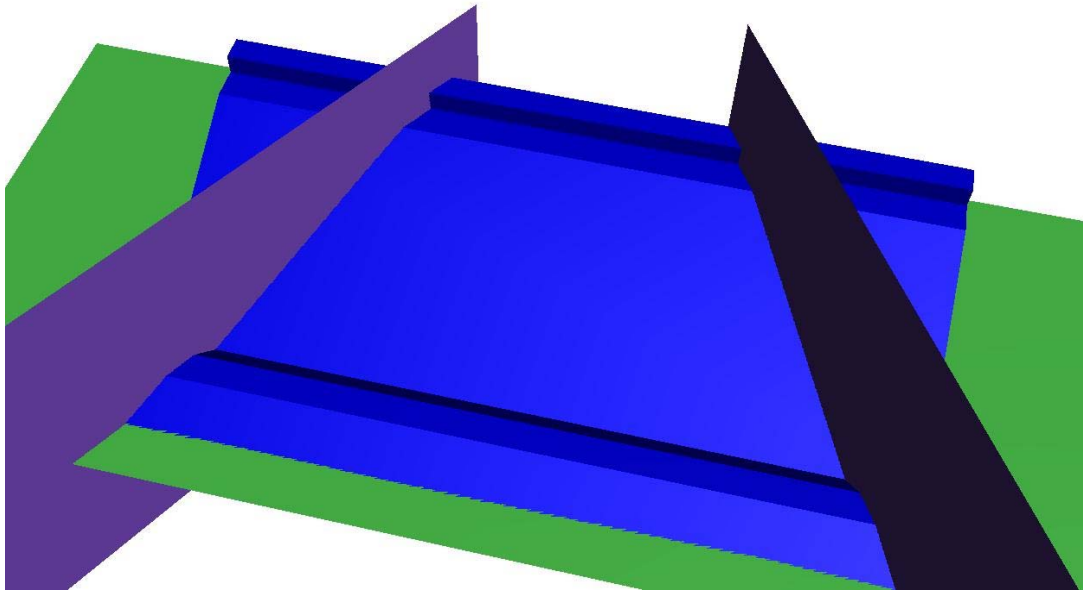


Figura 4.38. Planos auxiliares.

Como ya se hizo en el caso del dique completo, construimos la subbase de cubos dibujando una matriz de cubos a partir de uno solo:

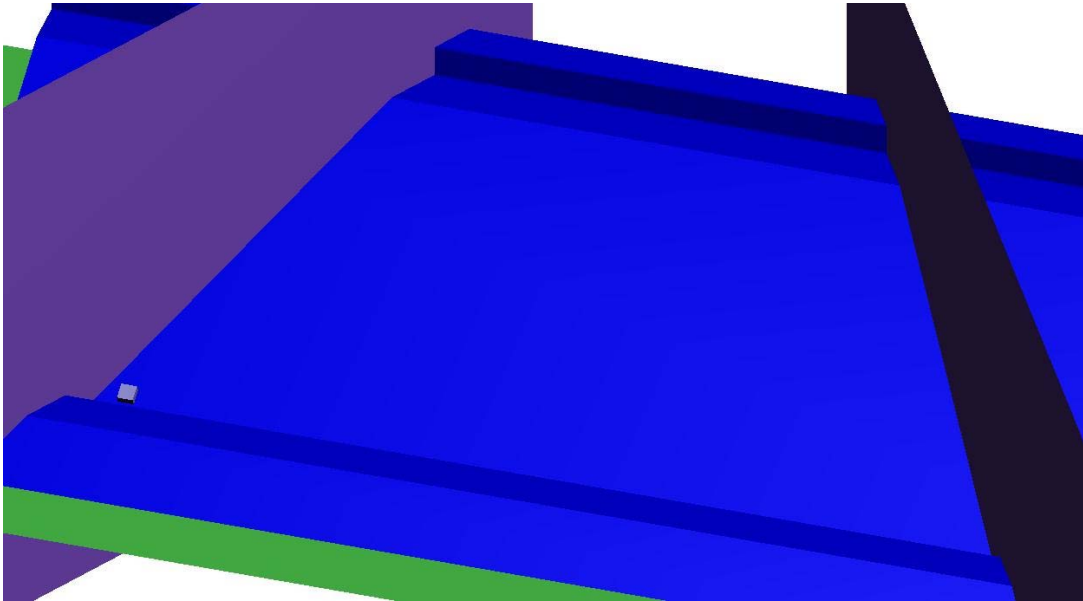


Figura 4.39. Cubo original a clonar.

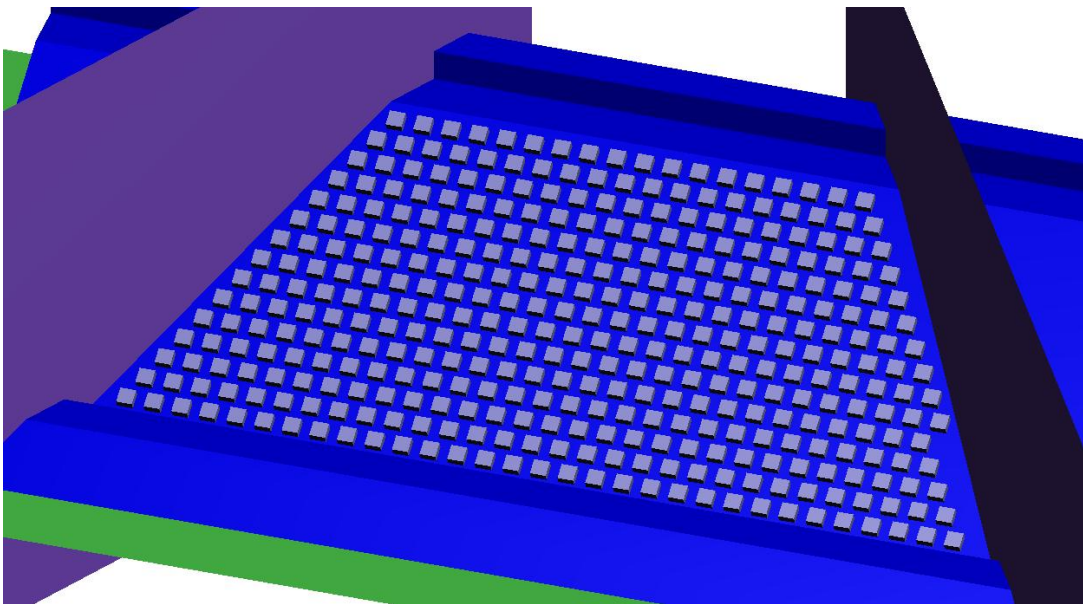


Figura 4.40. Matriz de cubos resultante.

Dibujamos ahora la superestructura de cubos en la coronación del dique. Al igual que antes, a partir de una matriz inicial de dimensiones 2x3 se construye el resto (Figura 4.42).

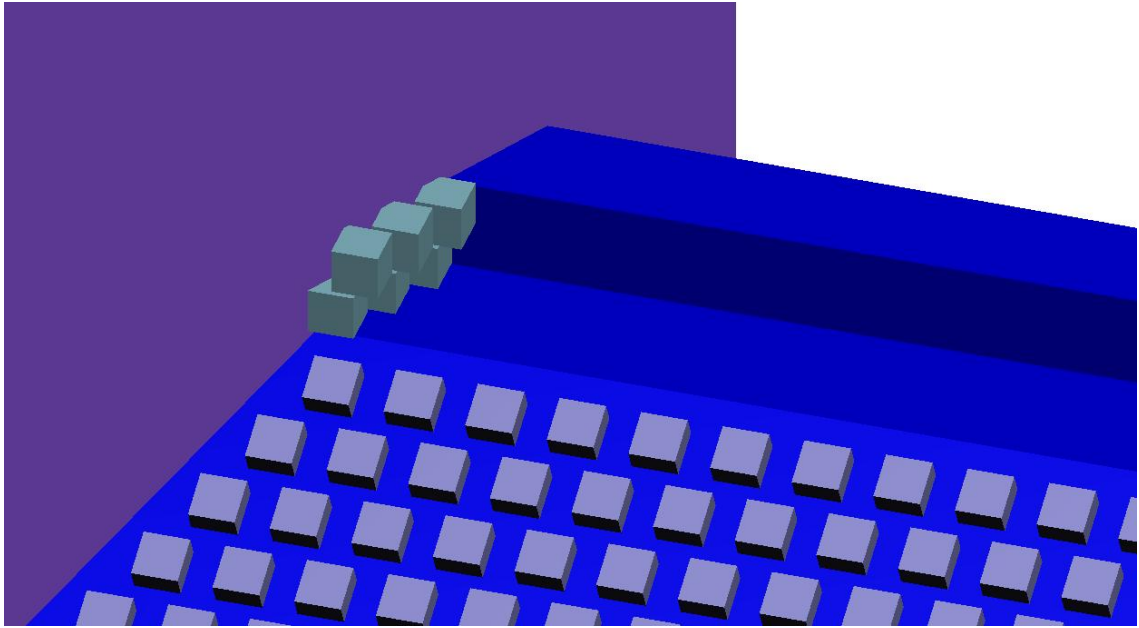


Figura 4.41. Matriz de cubos inicial.

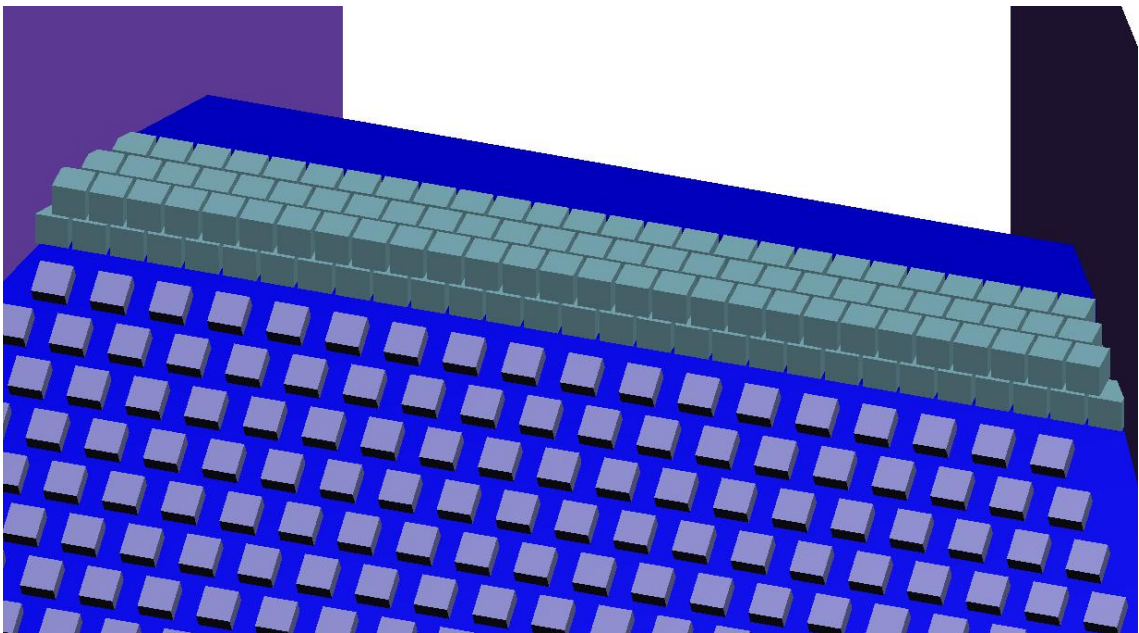


Figura 4.42. Superestructura terminada.

Ahora ya podemos colocar los cubos en el dique. Dibujamos los cubos que sean necesarios, unos 1200 en total, en distintas capas intentando que, tras la ejecución del programa de dinámica de sólidos, se coloquen de la mejor manera posible.

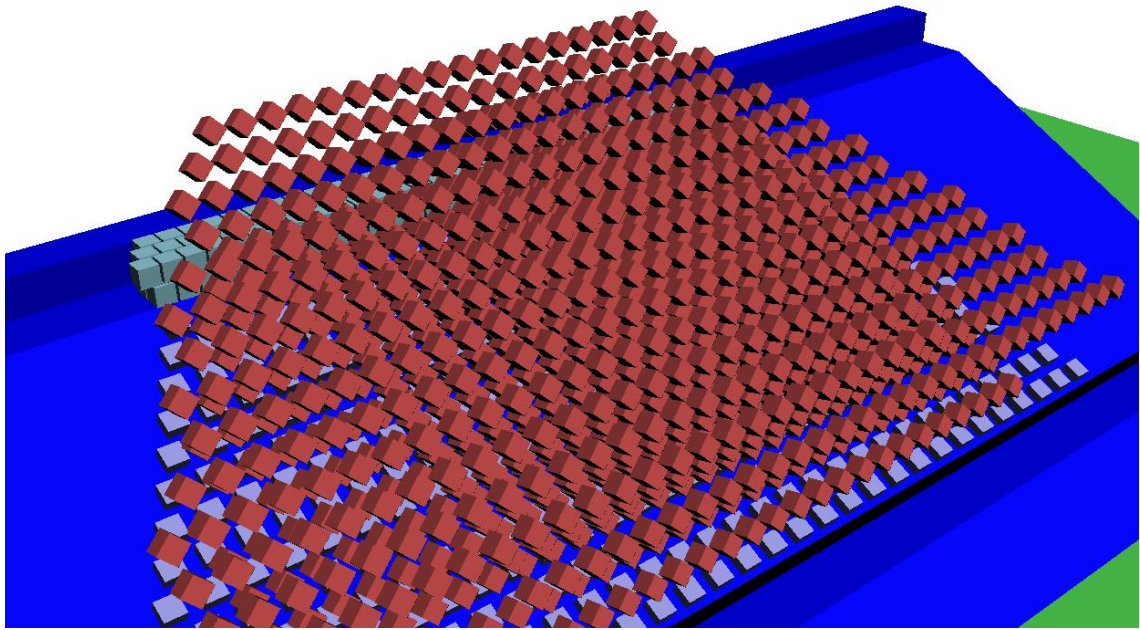


Figura 4.43. Conjunto de cubos antes de ser soltados.

Al igual que en caso anterior, hay que iterar hasta encontrar la solución apropiada. Los primeros resultados no son satisfactorios (Figura 4.44).

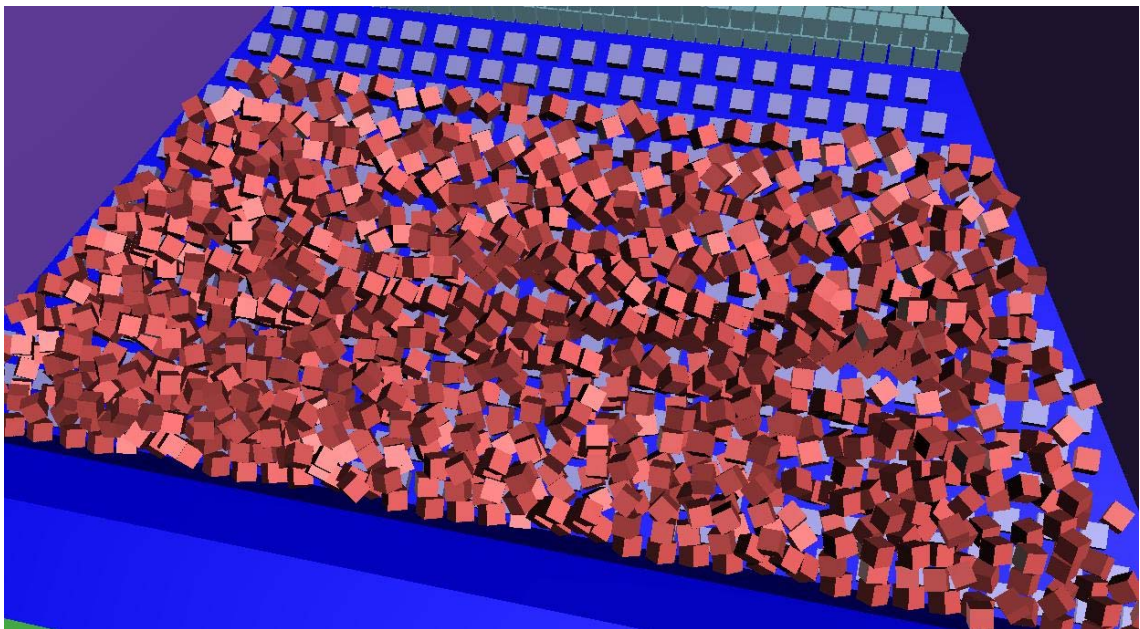


Figura 4.44. Cubos mal colocados.

Tras varios intentos, se consigue una configuración final de los sólidos correcta (Figura 4.45).

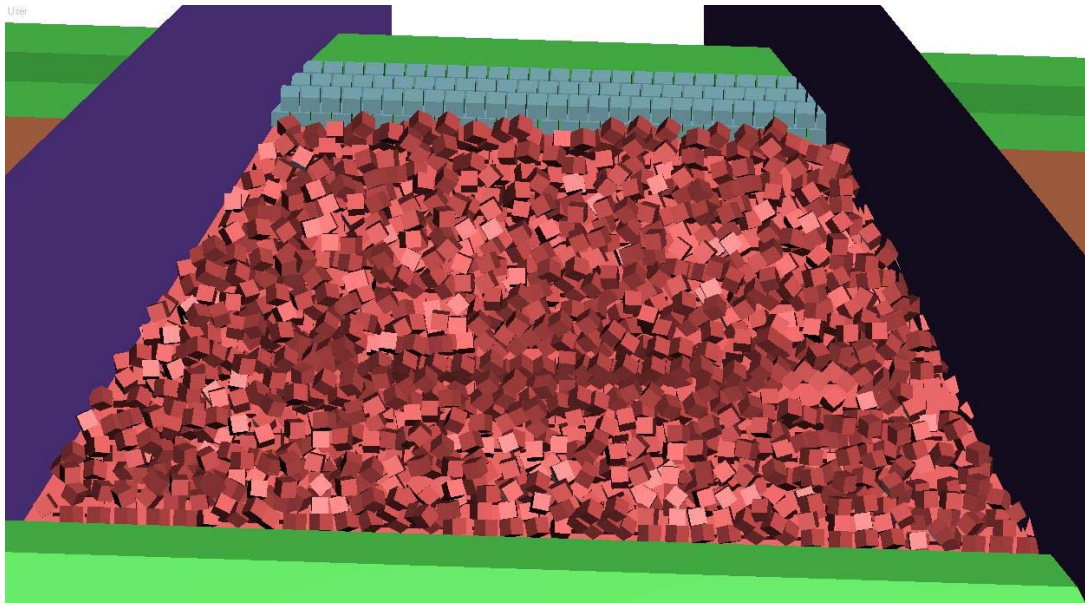


Figura 4.45. Cubos bien colocados.

Dibujamos ahora los dos planos verticales restantes que nos servirán para construir los canales necesarios para lanzar el caso con PFEM. Para ello seguimos las cotas del croquis original (Figura 4.46).

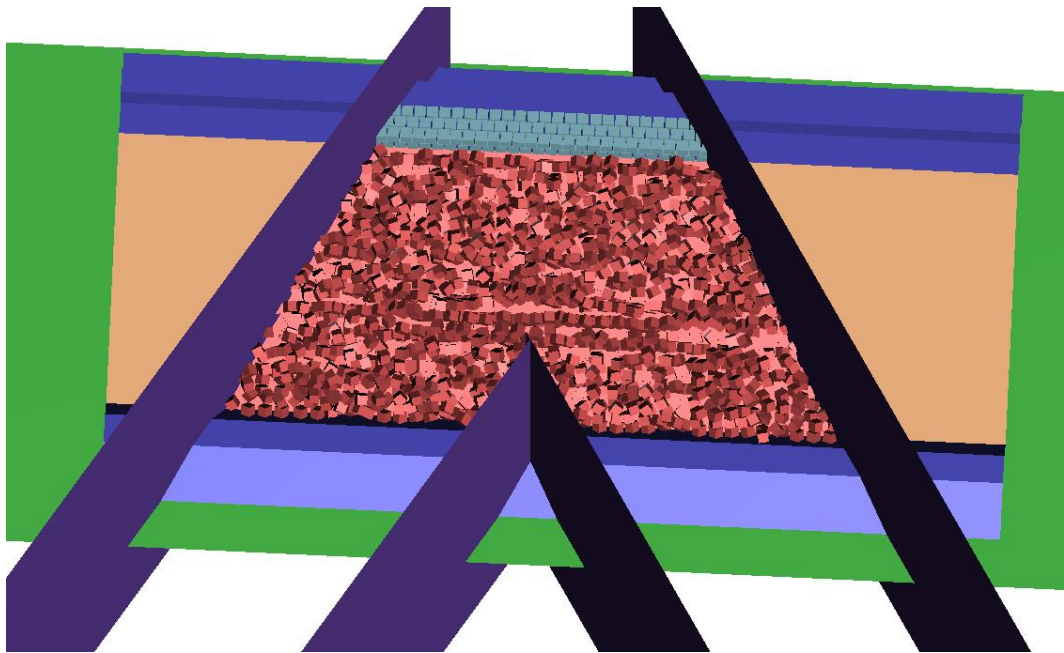


Figura 4.46. Planos verticales definitivos.

Realizamos las intersecciones entre planos correspondientes, como por ejemplo entre las 4 paredes y el plano del talud (Figura 4.47).

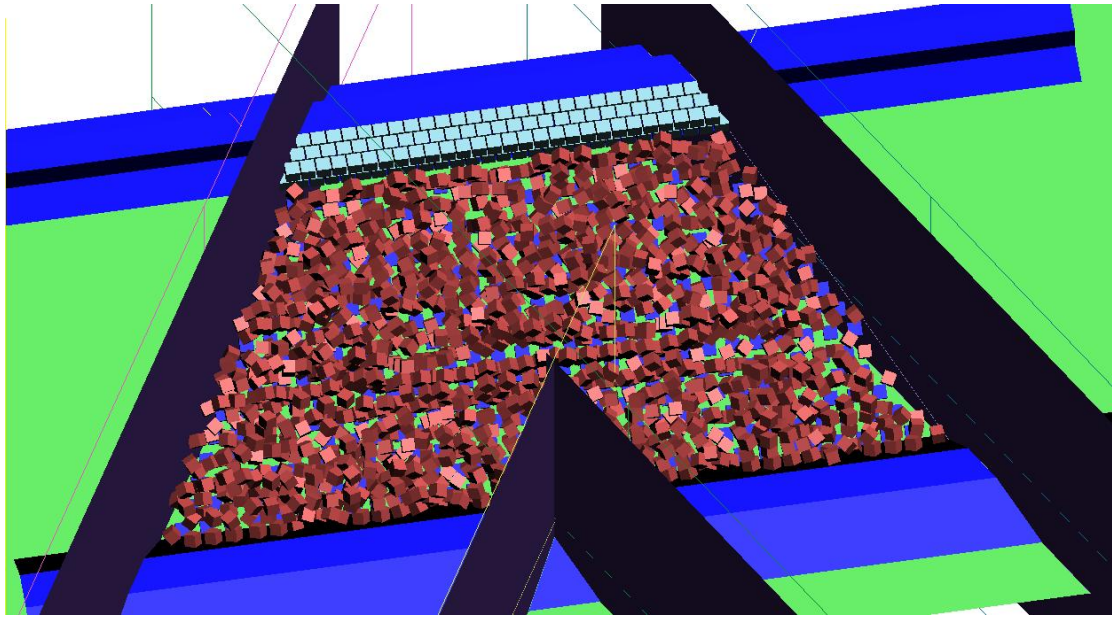


Figura 4.47. Intersecciones de los distintos planos con el talud.

A continuación se detalla la intersección de las paredes verticales externas con los cubos de la coronación (Figura 4.48).

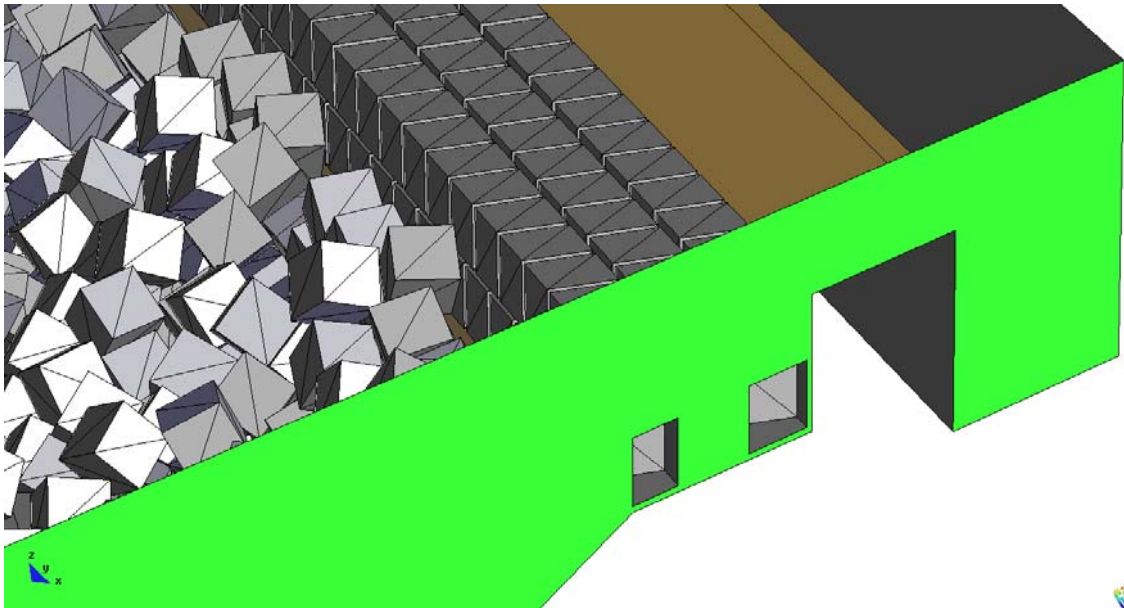


Figura 4.48. Detalle del corte entre las paredes y la superestructura.

Siguiendo los pasos del diseño del caso dique completo, construimos ahora el plano del talud cuyos orificios son el resultado de la intersección del plano original con la geometría de los cubos de la subcapa (Figura 4.49).

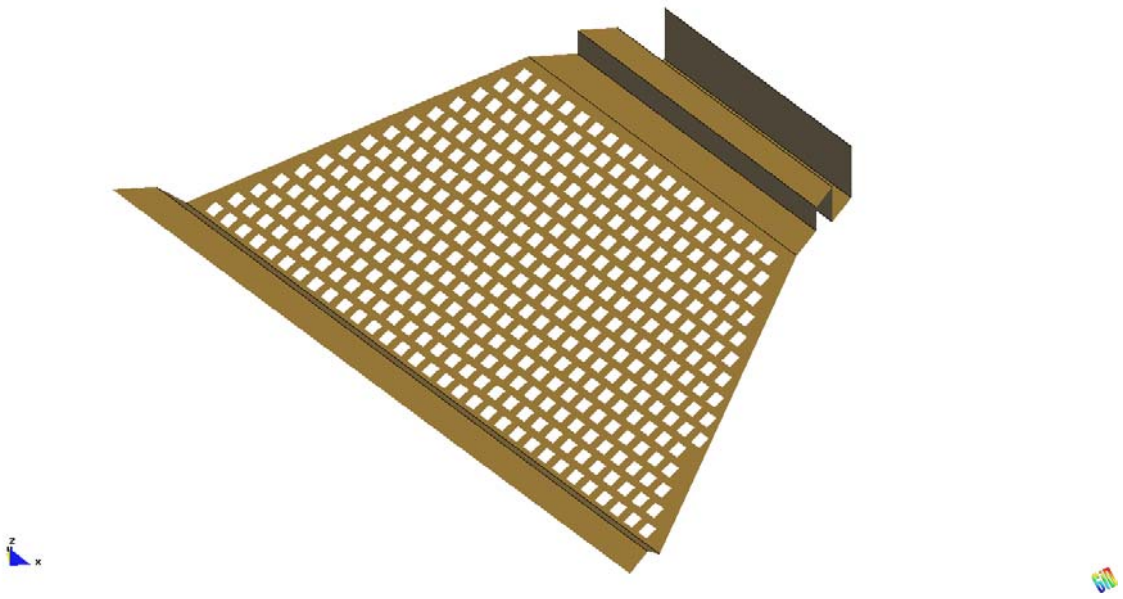


Figura 4.49. Plano del talud.

Finalizamos la geometría de la subbase de cubos uniendo el plano resultante anterior con la superficie de semicubos (Figura 4.50).

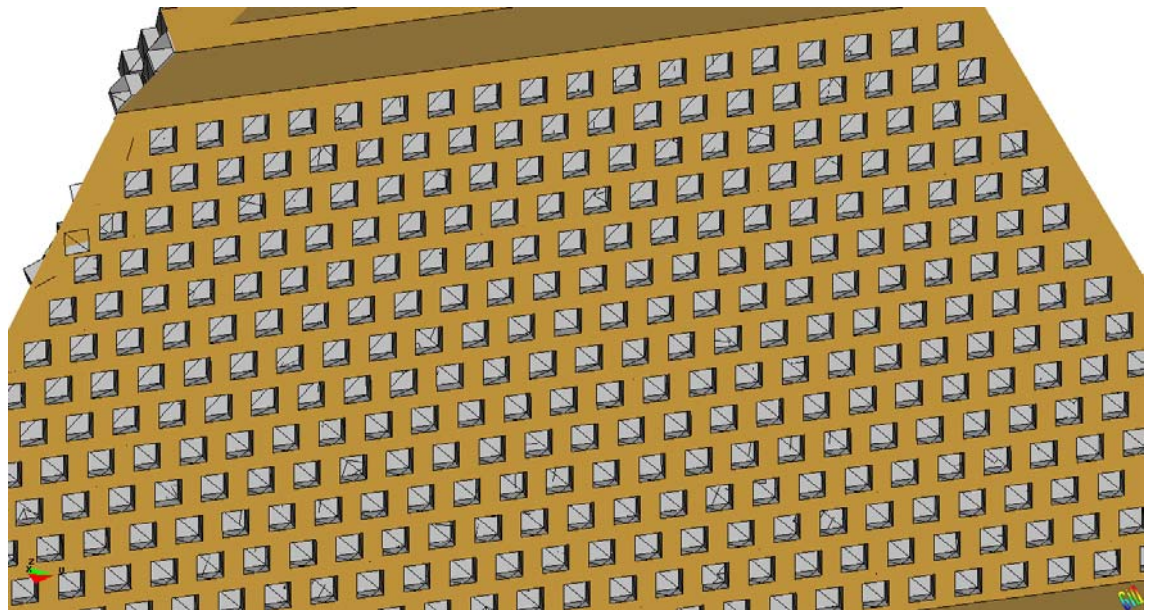


Figura 4.50. Geometría de la subcapa finalizada.

Dibujamos ahora los canales de ensayo. El primero será horizontal pero, como ya se ha comentado previamente, el segundo se tratará de un plano inclinado (Figura 4.51).

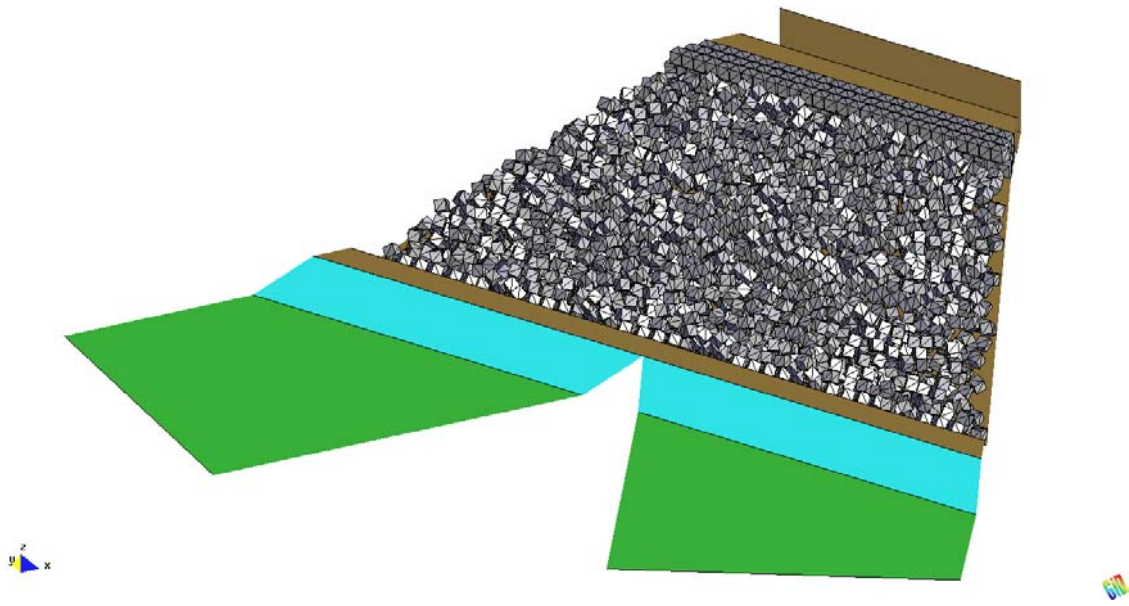


Figura 4.51. Detalle de los canales.

Realizamos el diseño de las paredes y la pala con la altura decidida (Figura 4.52).

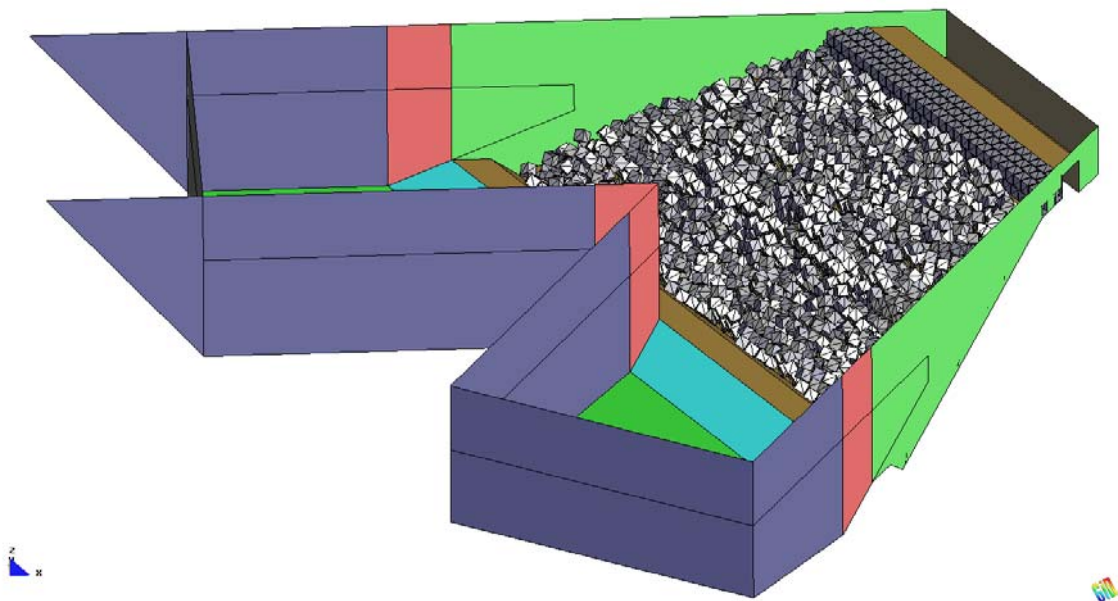


Figura 4.52. Geometría de las paredes y la pala.

Para acabar, se añaden las masas de agua que, al igual que los casos anteriores, se han dividido en tres grupos en los que la malla será más gruesa al lado de la pala y más fina junto al dique (Figura 4.53).

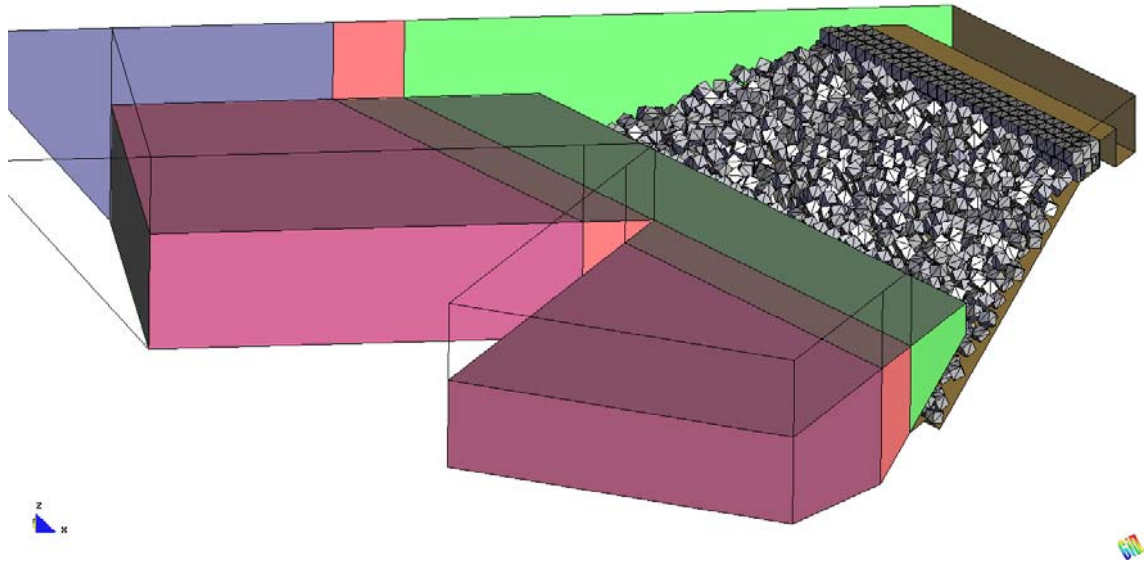


Figura 4.53. Masas de agua.

Una vez finalizada la geometría, se analiza el siguiente caso particular:

Oleaje de ángulo de incidencia de 30 grados, de 8m de altura de ola y 15 segundos de periodo. Cubos de 4m de lado, 150 T y malla gruesa.

En las Figuras 4.54 se observan los resultados obtenidos con PFEM. Se observa que la técnica empleada permite reproducir el efecto del tren de olas esviado sobre el manto de bloques.

Obsérvese que con el método propuesto se pueden capturar los efectos tridimensionales del impacto de las olas sobre el talud y sobre el rebase, típicos de estas situaciones.

Esta metodología se utilizará para realizar un estudio paramétrico del efecto del ángulo de esviaje del tren de olas en la altura del rebase.

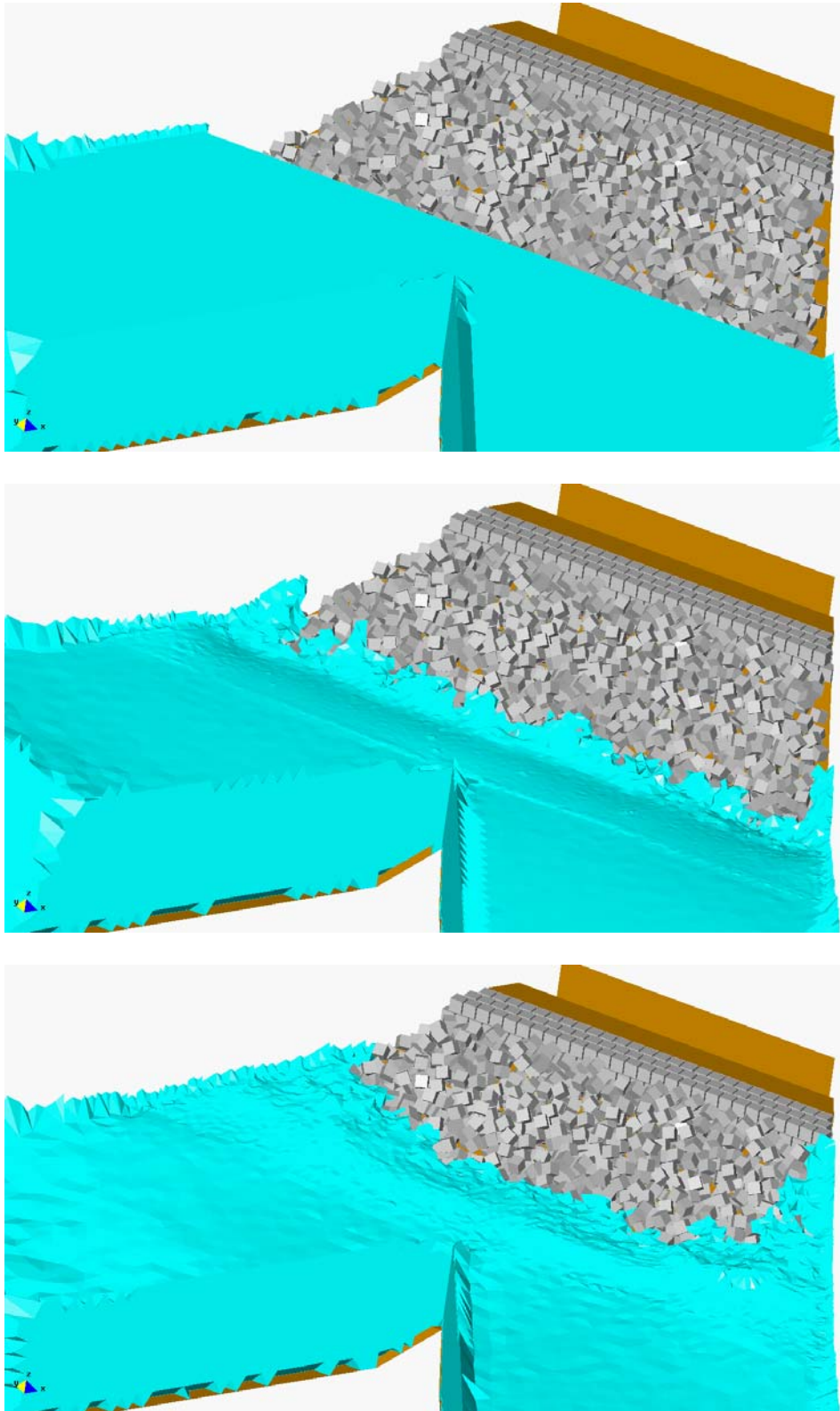


Figura 4.54. Análisis del impacto de un tren de olas esviado sobre un dique de bloques en talud.

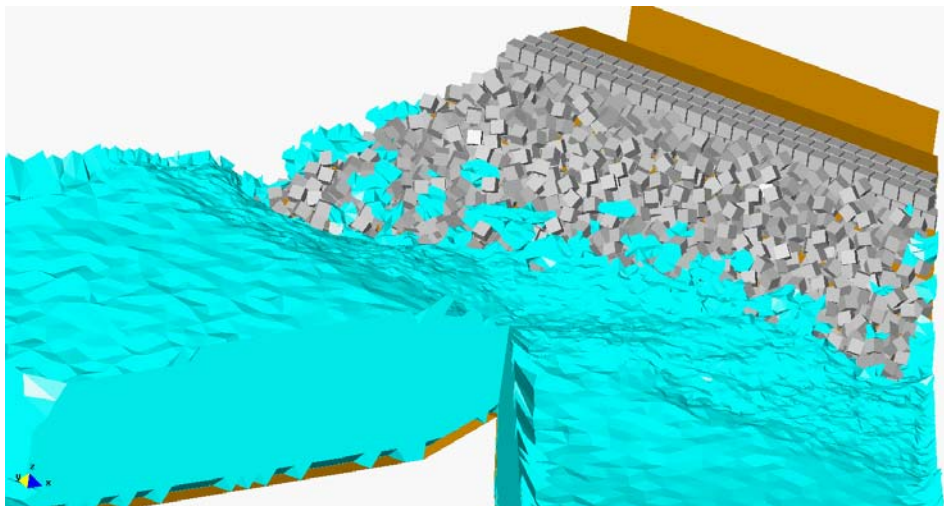
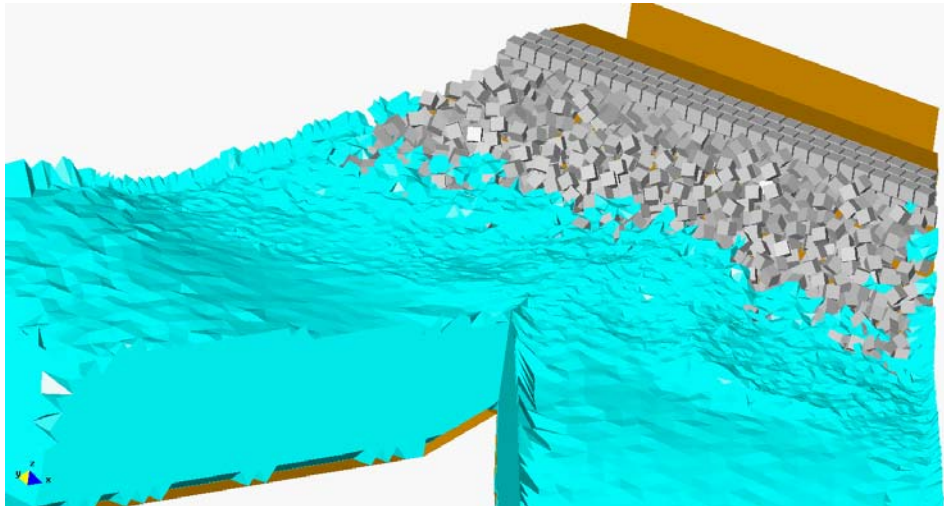
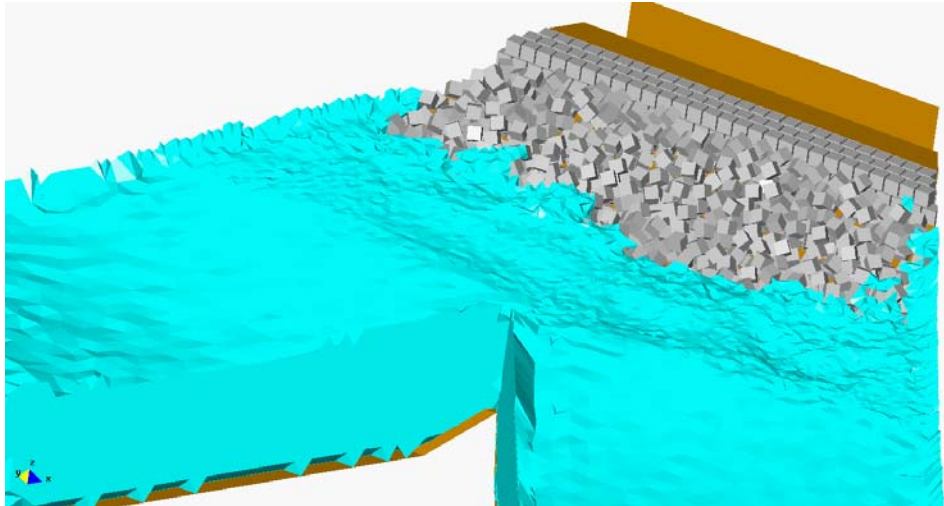


Figura 4.55. Análisis del impacto de un tren de olas esviado sobre un dique de bloques en talud (continuación).

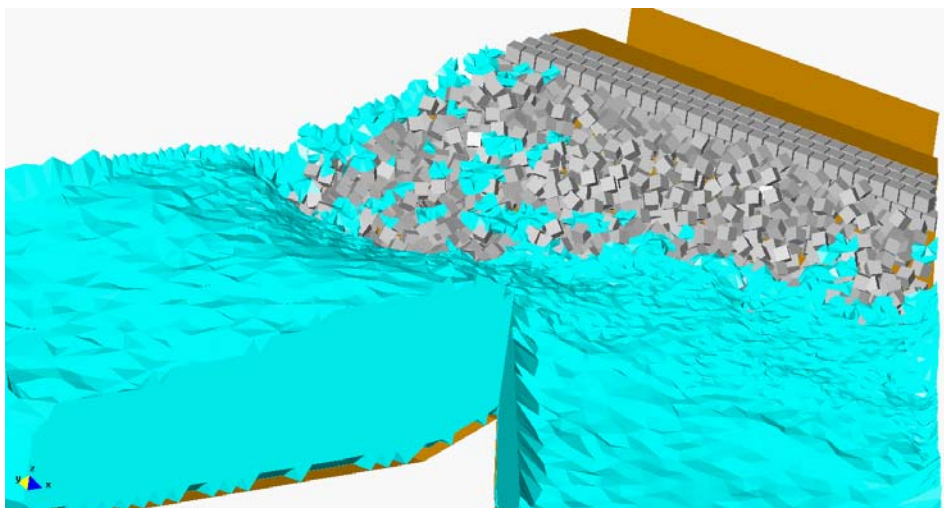
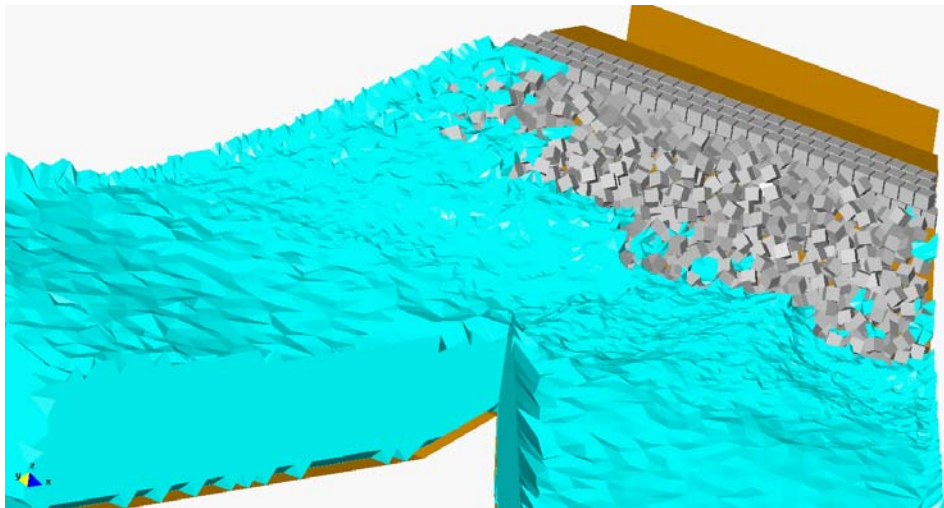
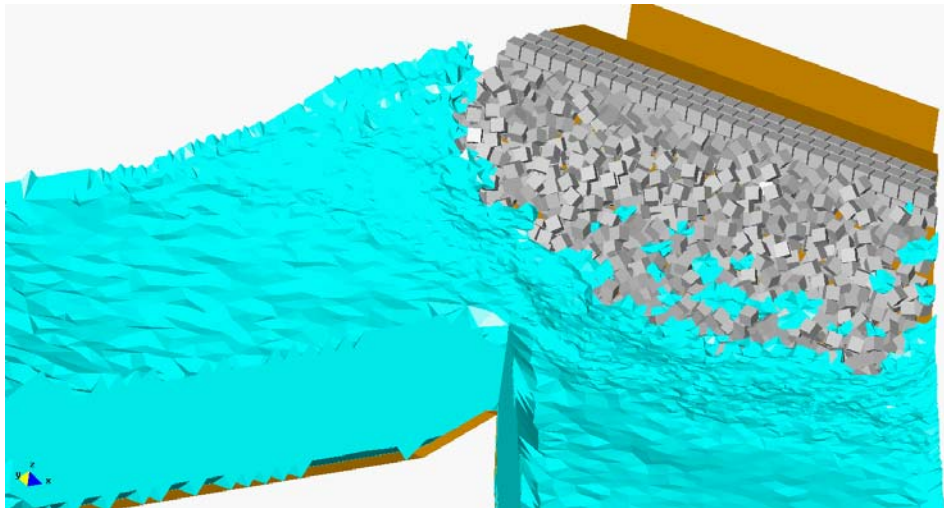
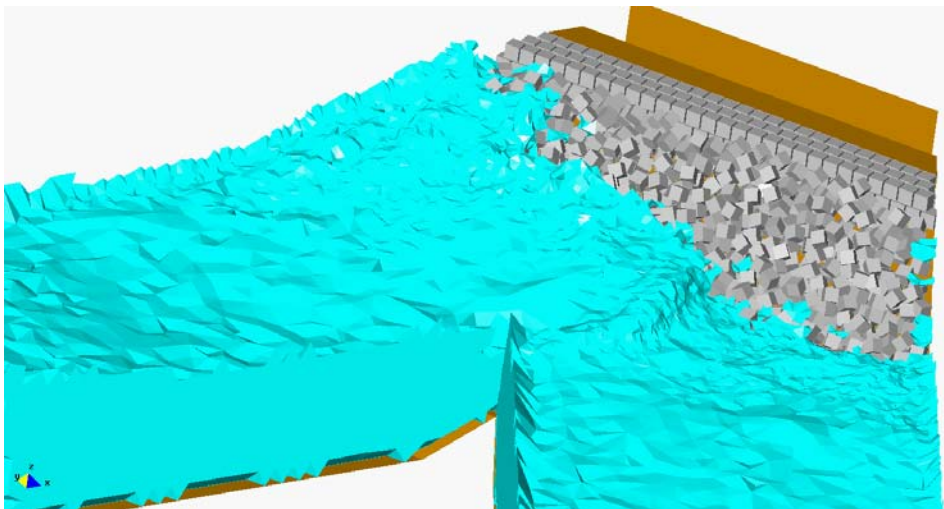
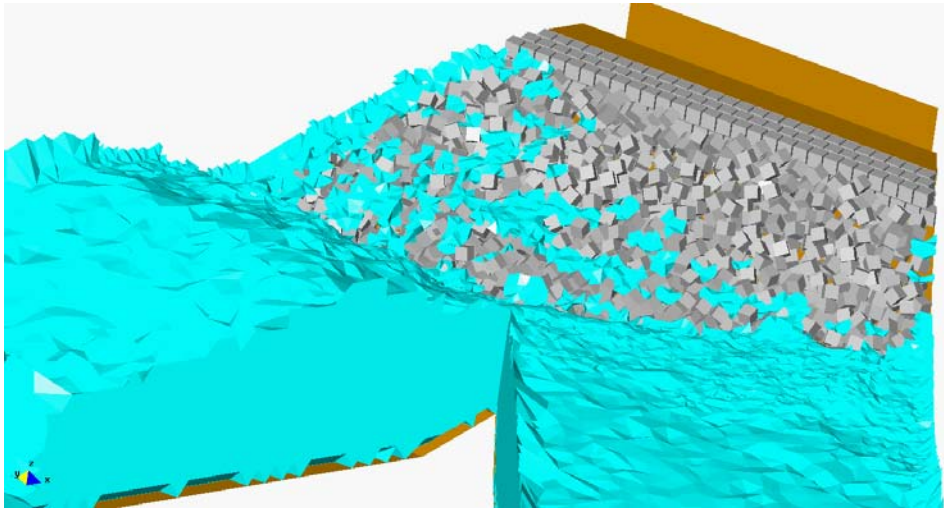
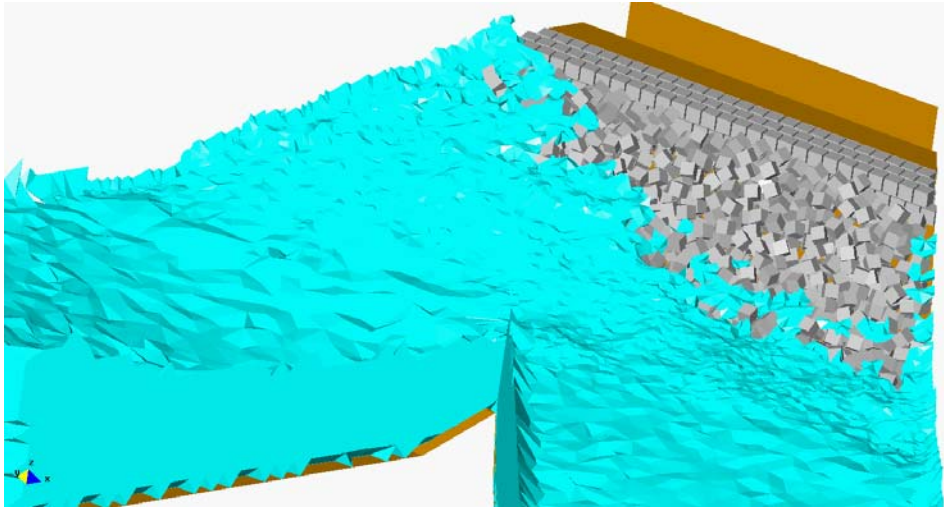


Figura 4.56. Análisis del impacto de un tren de olas esviado sobre un dique de bloques en talud (continuación).



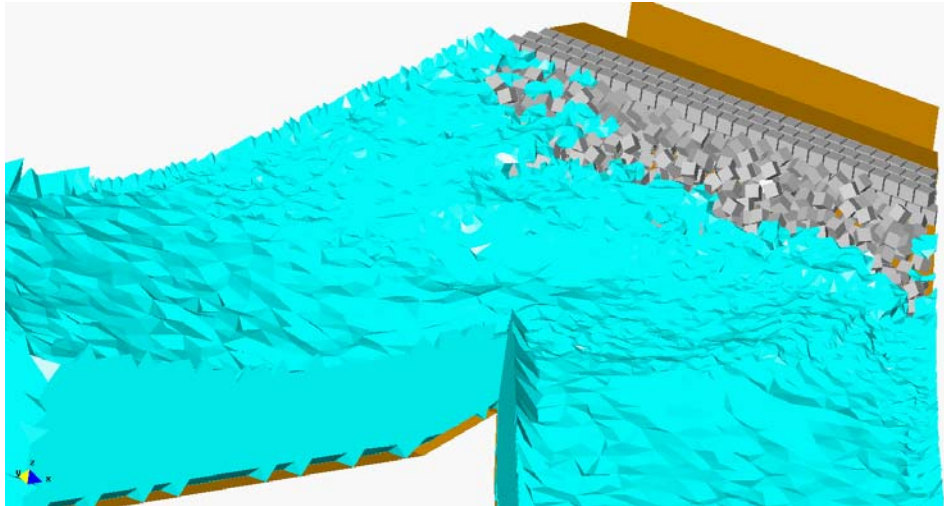


Figura 4.57. Análisis del impacto de un tren de olas esviado sobre un dique de bloques en talud.

4.3 Aplicación del PFEM al estudio de morros de invernada

Esta tarea ha consistido en el estudio del impacto del oleaje y el rebase producido por distintos trenes de olas en un morro de invernada.



Figura 4.58. Morro de invernada.

La modelización geométrica del morro se efectuará utilizando la técnica de generación de bloques sobre diques en talud descrita en el Apartado 4.2. Las características del PFEM permiten reproducir los efectos tridimensionales que se producen al incidir un tren de olas sobre un morro de invernada.

En las figuras de las páginas siguientes se muestran varios resultados del estudio realizado. Las figuras muestran varios instantes del impacto de un tren de olas sobre un morro de invernada analizado con el PFEM.

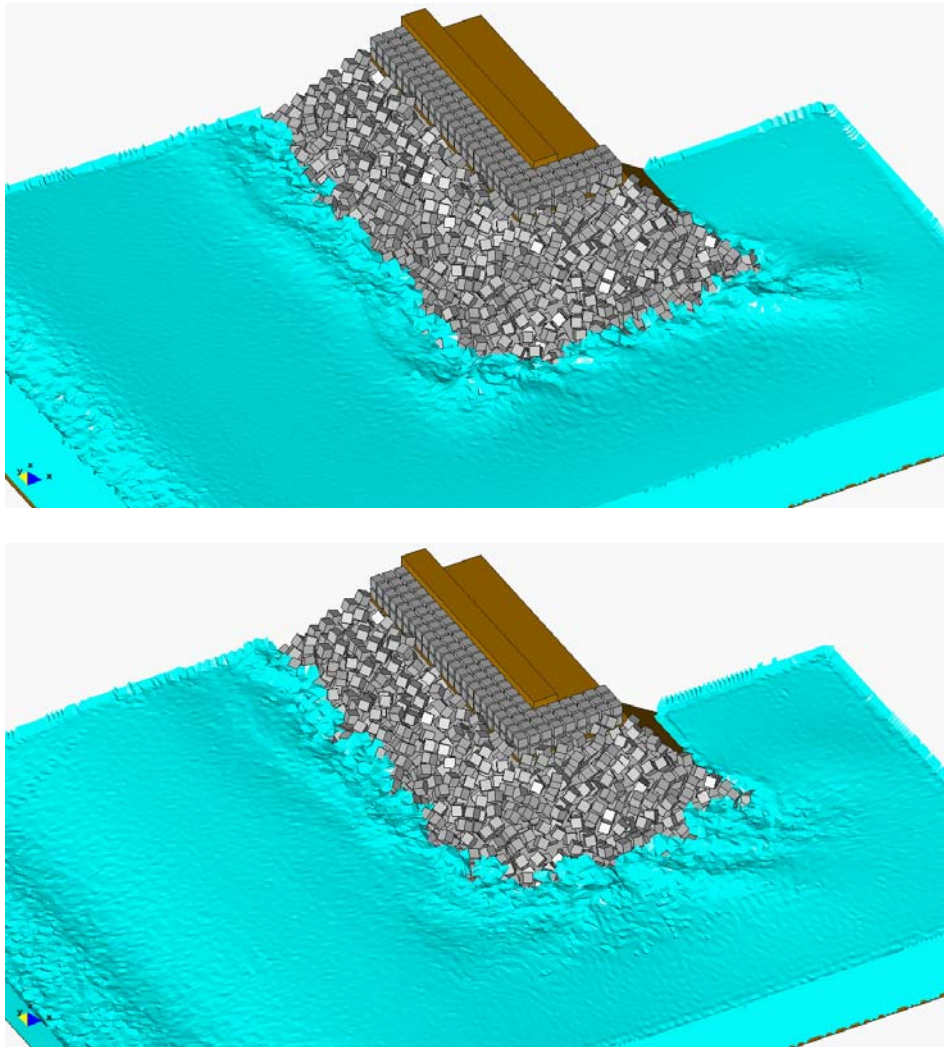


Figura 4.59a. Estudio del impacto de un tren de olas sobre un morro de invernada con la técnica PFEM.

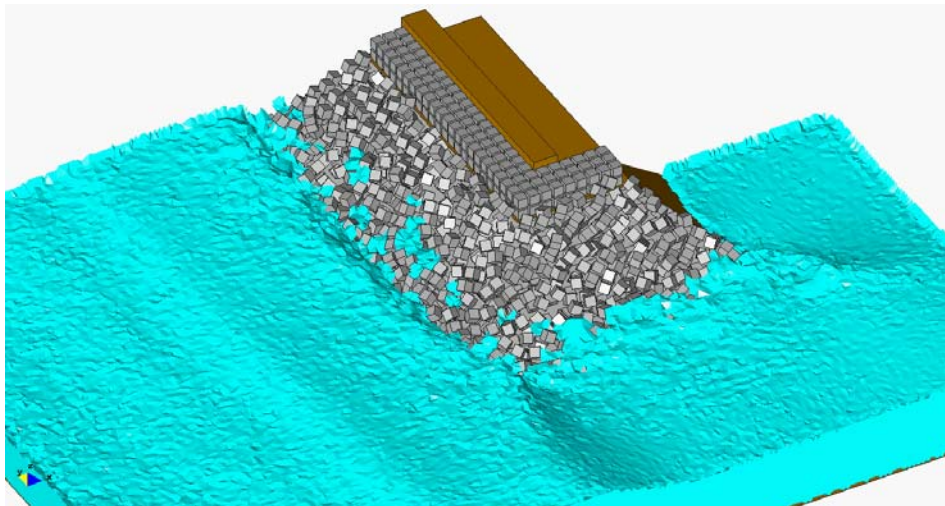
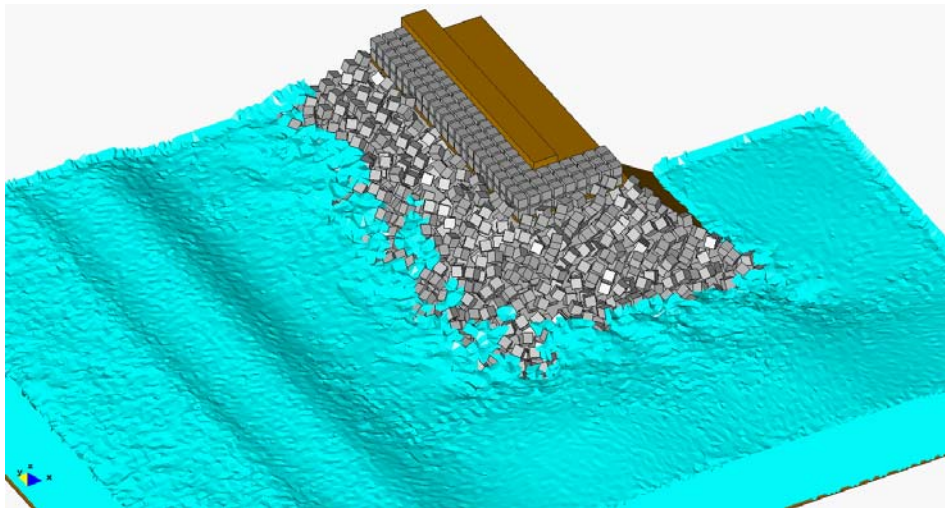
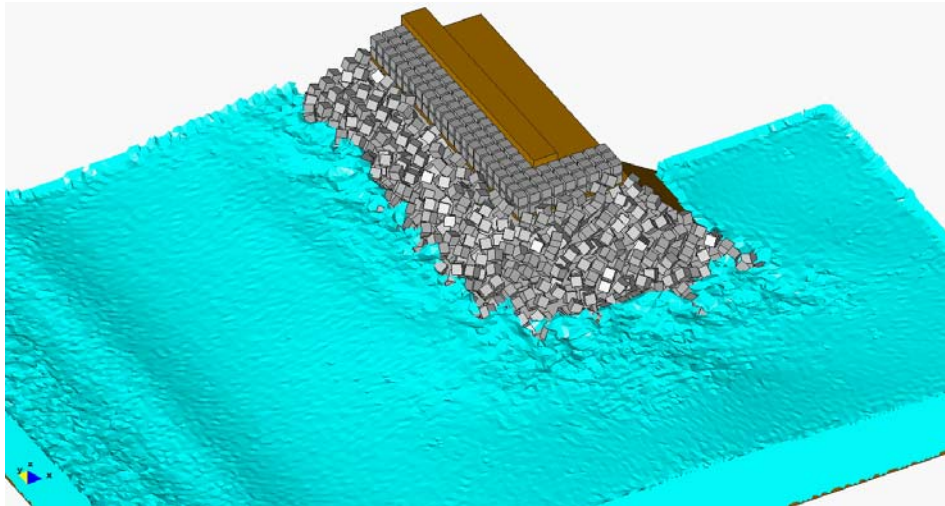


Figura 4.59b. Estudio del impacto de un tren de olas sobre un morro de internada con el PFEM (continuación).

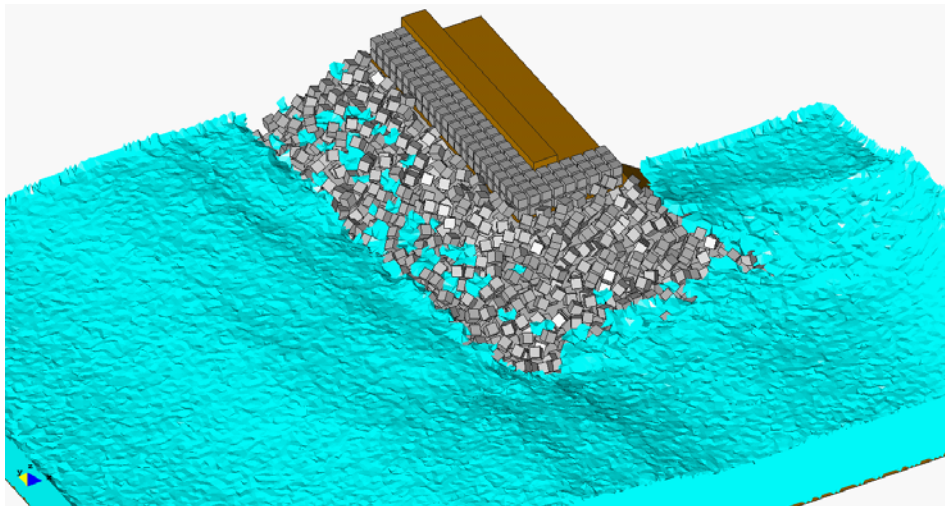
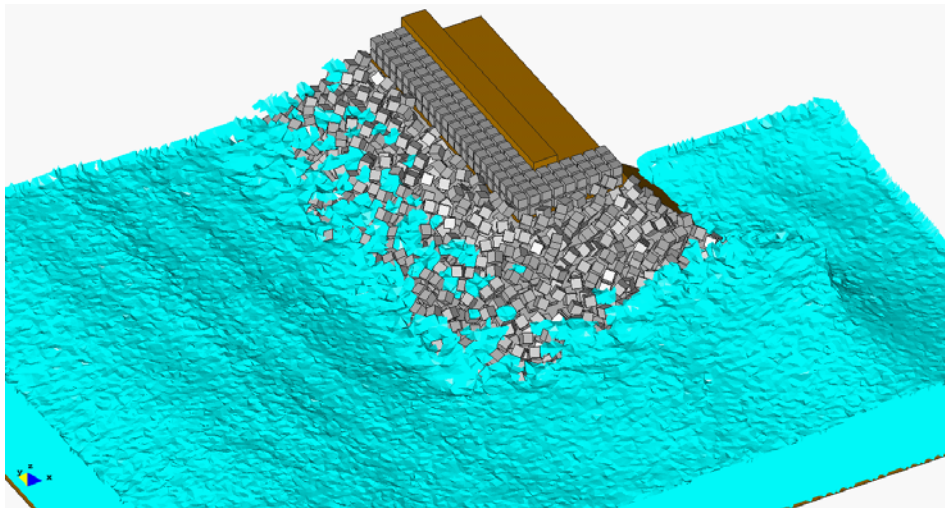
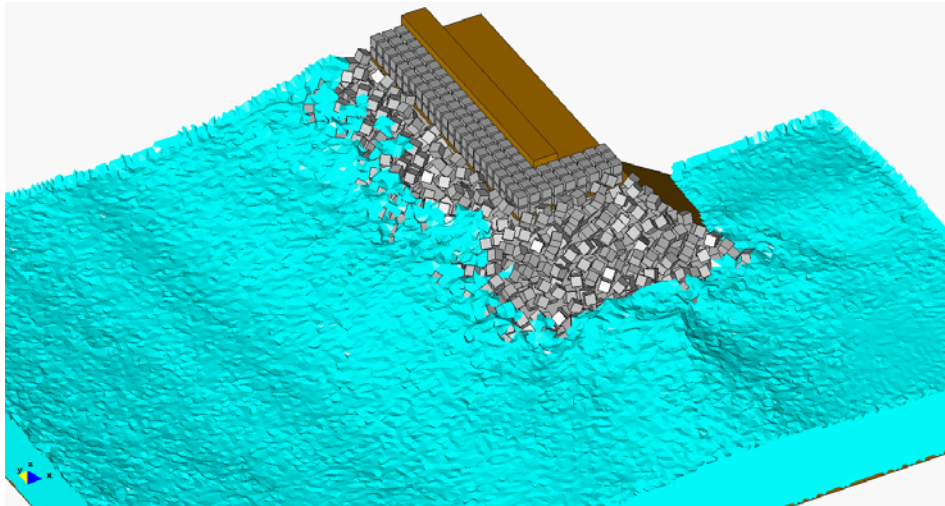


Figura 4.59c. Estudio del impacto de un tren de olas sobre un morro de invernada con la técnica PFEM (continuación).

4.4 Generación de la geometría para el caso de estudio de la importancia del rebase en la seguridad de las superestructuras

El objetivo de esta subtarea es analizar la seguridad de elementos colocados en la zona superior del dique (coches, camiones, grúas, edificios, etc.) en situaciones de rebase. Esta tarea exige la generación de la geometría del objeto a analizar y el posterior estudio de su estabilidad bajo la acción del oleaje producido por el rebase.

Como ejemplo de la metodología desarrollada se explica a continuación el proceso de generación de una geometría que permita estudiar con el PFEM el hipotético caso de un tramo de dique en construcción sometido a la acción de un excesivo oleaje. Se supondrá que en la coronación del dique se están realizando trabajos de obra, con lo que el objeto de estudio en este caso es la estabilidad de un camión de obra tipo sometido a las fuerzas inducidas por el rebase.

Partimos de la geometría de un minidique, cuyas dimensiones son: 25 metros de altura, 40 metros de longitud, 20 de ancho y 18 metros de calado de agua.

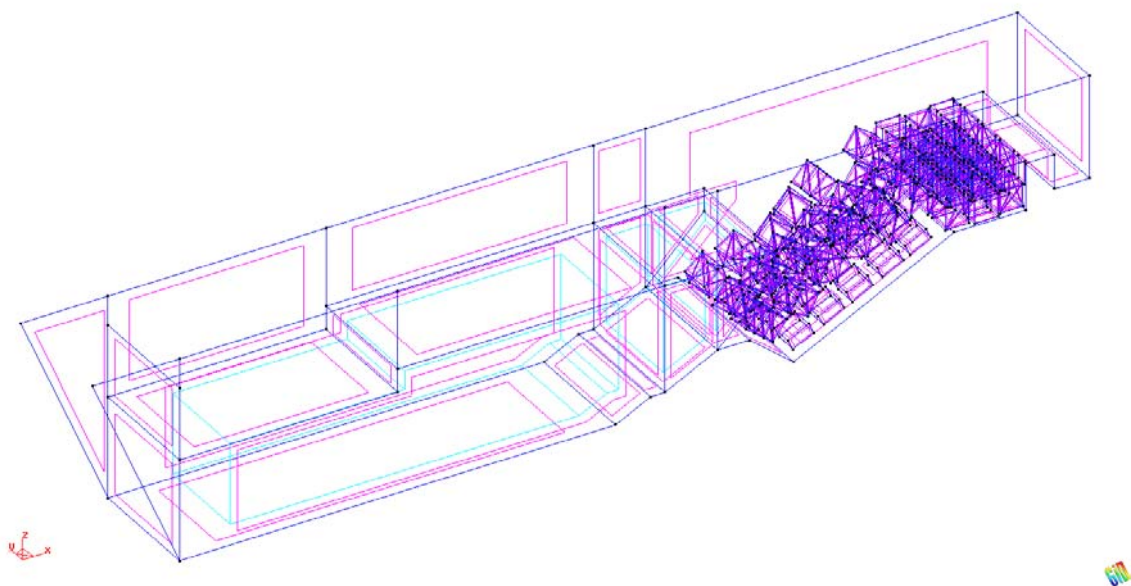


Figura 4.60. Minidique.

Se supone que el dique a diseñar está a medio construir, por lo que se supone que en la coronación del dique no existirá ningún tipo de superestructura, únicamente una superficie plana sobre la cual se realizarán trabajos, habrá movimiento de maquinaria, etc.

Se modifica por tanto la coronación del dique, dejándose plana:

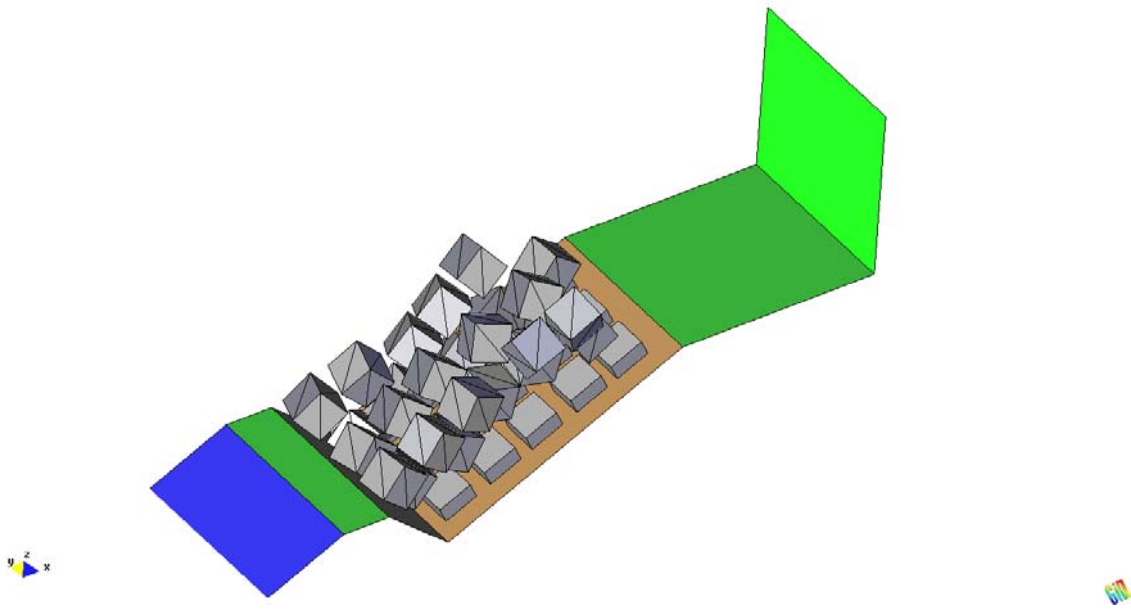


Figura 4.61. Detalle de la nueva coronación de dique.

El siguiente paso es escoger un modelo para el diseño de la geometría de nuestro camión. Se ha utilizado el siguiente modelo:



Figura 4.62. Ejemplo de modelo de camión.

Dicho camión dispondrá de las siguientes medidas: 8 metros de longitud y una sección transversal aproximada de $2.5 \times 2.5 \text{ m}^2$.

Se crea en CAD un diseño simplificado del camión como el siguiente:

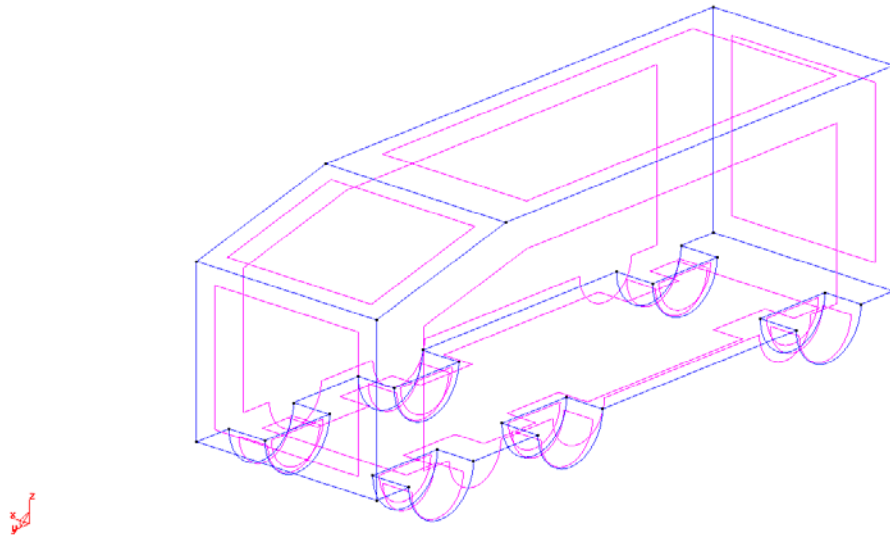


Figura 4.63. Geometría del camión.

Se introduce para acabar la geometría anterior en la explanada de coronación del dique, finalizando así la geometría que será estudiada con PFEM:

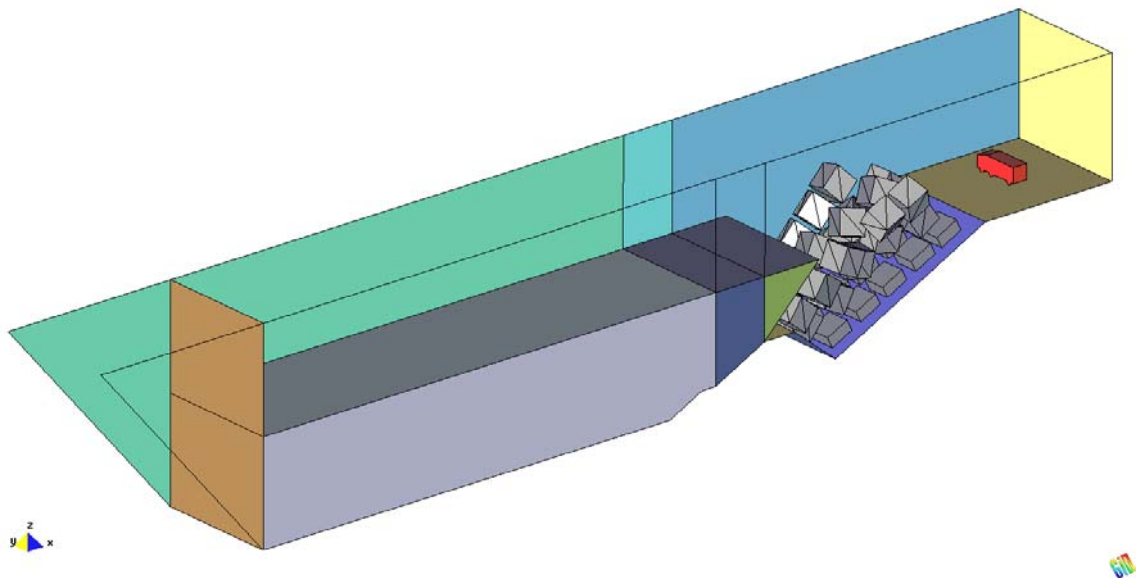


Figura 4.64. Geometría finalizada.

5. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTUDIO DE LOS EFECTOS CAUSADOS POR REBASES SOBRE ELEMENTOS Y EQUIPOS DE OBRA EN CORONACIÓN DE UN DIQUE

5.1 Motivación, objetivos y resumen del trabajo

Los rebases en diques pueden tener efectos devastadores sobre vehículos, instalaciones, equipos y otros elementos de obra colocados sobre u en las proximidades del dique, (además indudablemente sobre las personas que en encuentran en esa zona).

El objetivo de esta tarea ha sido el desarrollo de una metodología de cálculo para estudiar los efectos causados por los rebases sobre elementos de obra ubicados en la proximidad de la coronación de un dique.

Para conseguir ese objetivo se ha utilizado una nueva técnica de cálculo basada en el PFEM que permite estudiar los movimientos y fuerzas producidos en un objeto sometido a la acción de una corriente de agua, teniendo en cuenta todos los complejos efectos que intervienen en un problema de interacción fluido-estructura.

El trabajo en la tarea ha consistido en el desarrollo del PFEM para modelar y simular una corriente de agua en lámina libre y su interacción con un objeto de forma arbitraria. Seguidamente se ha estudiado los movimientos y fuerzas sobre objetos colocados sobre un dique y sometidos a diversas situaciones de rebase. La idea final es el desarrollo e implantación de un sistema experto que permita predecir los movimientos en un objeto sobre el dique en una situación de rebase determinada en tiempo cuasi-real.

5.2 Descripción de las tareas realizadas

La primera parte del trabajo en esta tarea ha consistido en el desarrollo del PFEM para el estudio de problemas de interacción fluido-estructura producidos por el impacto del rebase del oleaje sobre objetos colocados sobre un dique o en las inmediaciones del mismo.

Una vez completados los desarrollos teóricos sobre el PFEM e implantados en un programa de cálculo se procedió al calibrado y validación de dichas técnicas en su aplicación al estudio del impacto de corrientes de agua sobre objetos. Para ello se estudiaron una serie de casos *analizados experimentalmente* en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona tal y como ya se explicó en el capítulo 3. La concordancia entre los resultados experimentales y los obtenidos por el PFEM fue buena, demostrando así la validez del PFEM para el estudio de corrientes de agua y su efecto en el movimiento de cuerpos.

El paso siguiente fue estudiado de forma sistemática los movimientos de objetos de distinta forma y tamaño colocados sobre un dique y sometidos a diferentes situaciones de rebase. En cada caso de estudio se obtuvo la evolución temporal de los movimientos de cuerpos y las fuerzas de interacción fluido-estructura en las tres dimensiones del espacio debido al impacto del rebase sobre el cuerpo.

De esos resultados se extrajeron los valores máximos de movimientos y con ellos se educará una Red Neuronal con el fin de poder predecir de forma inmediata los efectos de un rebase sobre un objeto determinado.

El sistema experto permite leer historias de rebase obtenidas por métodos analíticos o numéricos (siempre que estén dentro del rango de los casos utilizados para educar la Red Neuronal) y estudiar el efecto de cada rebase sobre los objetos seleccionados. De esta manera desde el sistema experto puede estudiarse el efecto de un rebase sobre un elemento de obra colocado sobre un dique.

Se procede entonces al estudio de un primer caso particular. Una vez terminada la geometría correspondiente tal y como se detalla en el capítulo anterior, se analiza el siguiente caso:

Oleaje perpendicular de 18 m. de altura de ola y 8 segundos de periodo
Cubos de 4 m. de lado y 150 T
Camión de 40 T

En las Figuras 5.1 que se muestran a continuación se pueden apreciar los resultados obtenidos con el PFEM.

Obsérvese como las olas producidas por el rebase provocan un desplazamiento significativo del camión, que se ve arrastrado por la fuerza del oleaje.

Este ejemplo muestra las posibilidades del PFEM para el estudio de la estabilidad de objetos colocados sobre el dique bajo la acción de las olas producidas por el rebase.

Se ha mejorado la capacidad del PFEM para realizar este tipo de estudios y se ha desarrollado una metodología para parametrizar el análisis del impacto de las olas producida por el rebase en objetos colocados sobre el dique, en función de los caudales de rebase. Esta metodología se utilizará en el desarrollo de un sistema de apoyo a la decisión (SAD) para este tipo de situaciones.

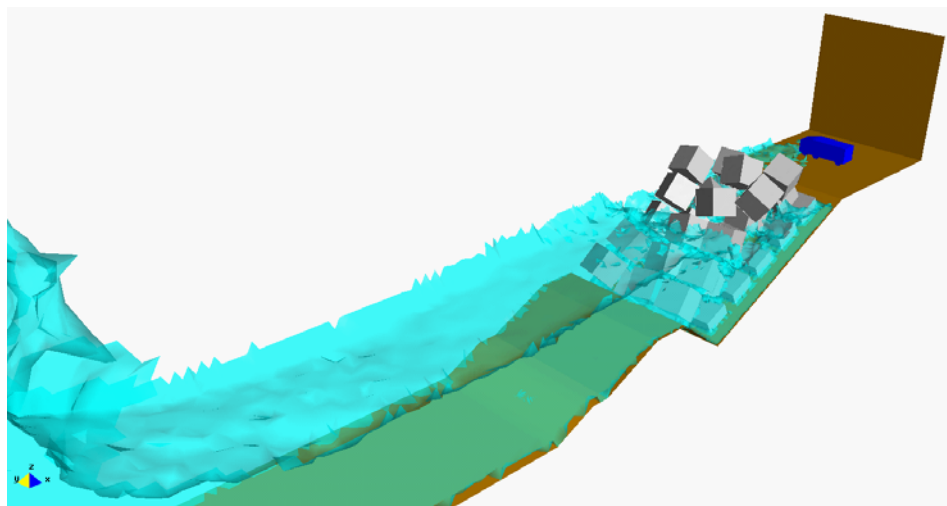
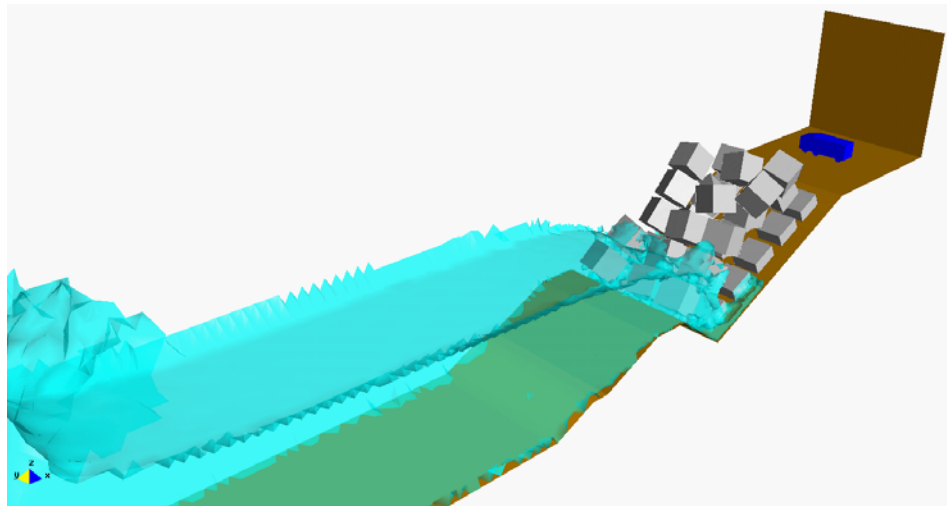
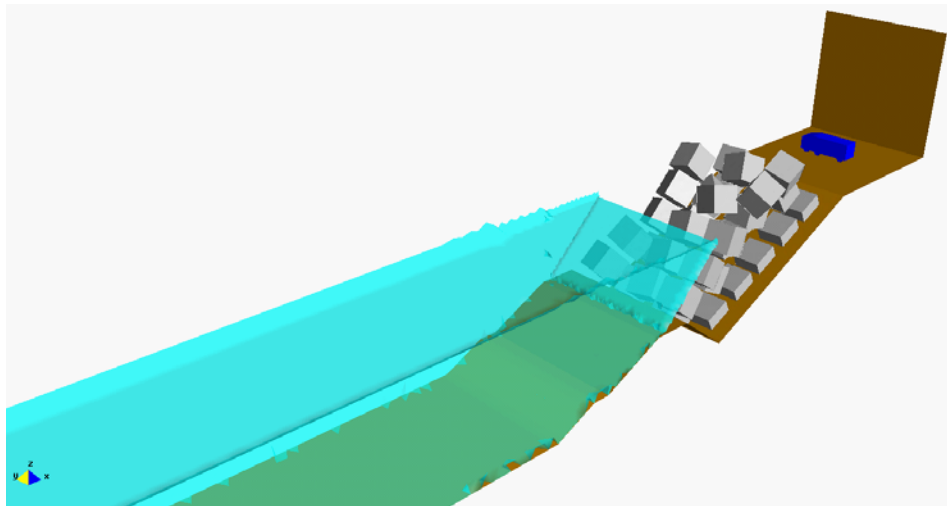


Figura 5.1a. Estudio del impacto de las olas producidas en el rebase sobre el camión.

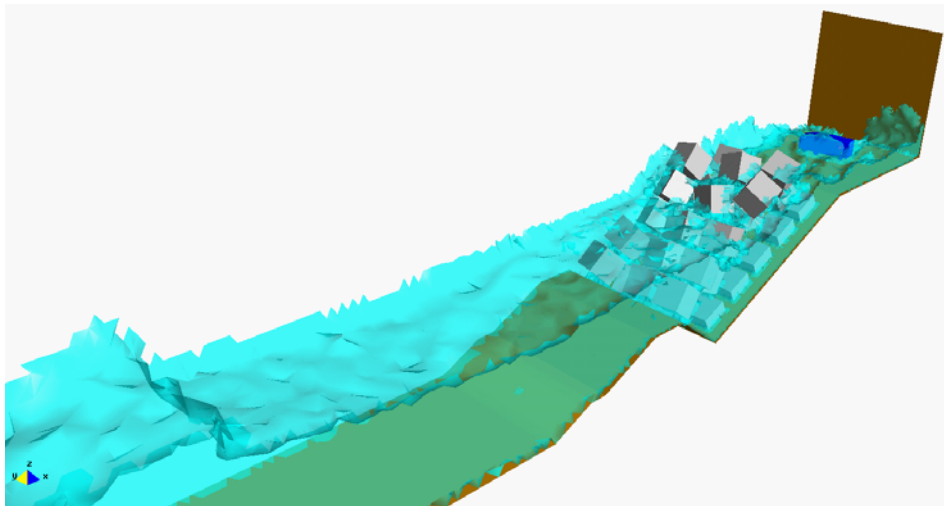
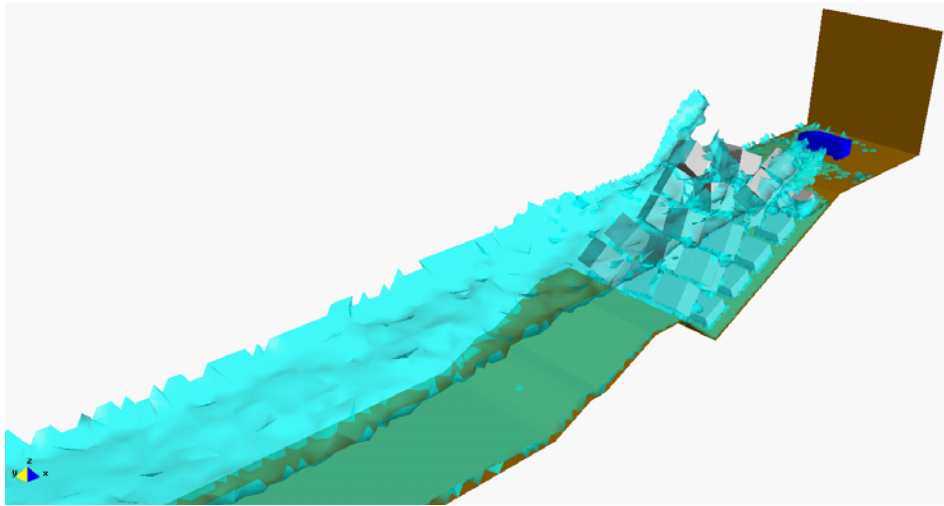
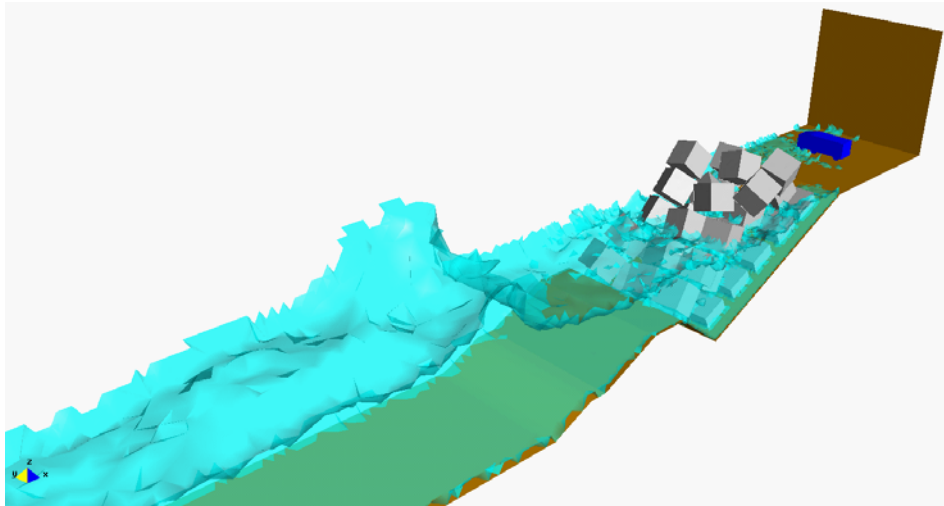


Figura 5.1b. Estudio del impacto de las olas producidas en el rebase sobre el camión (continuación).

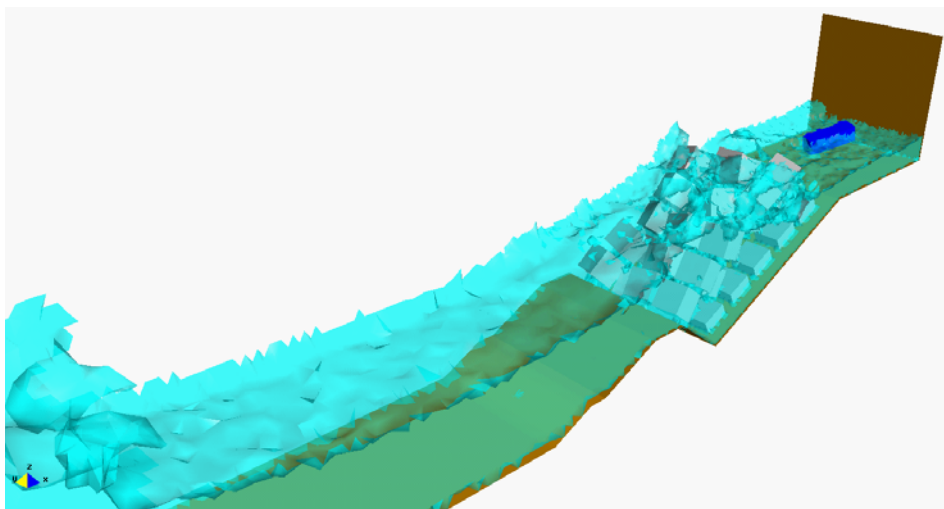
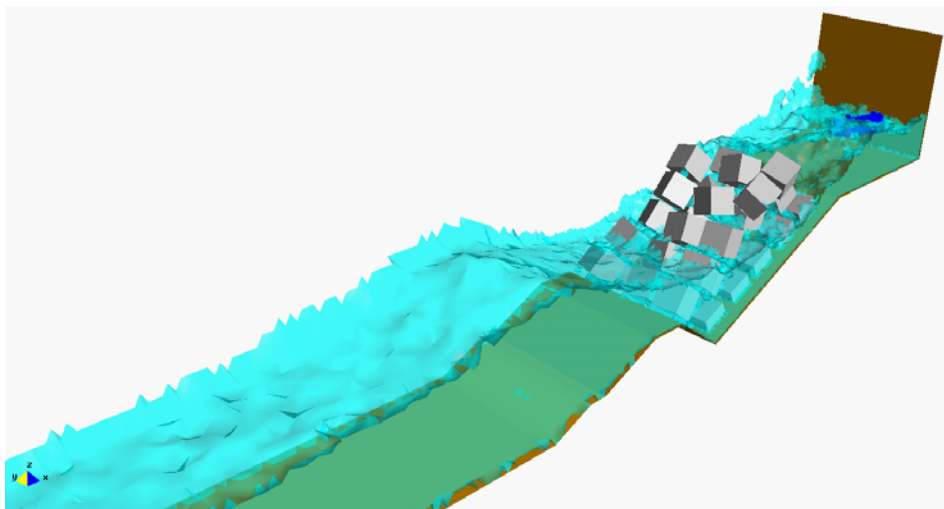
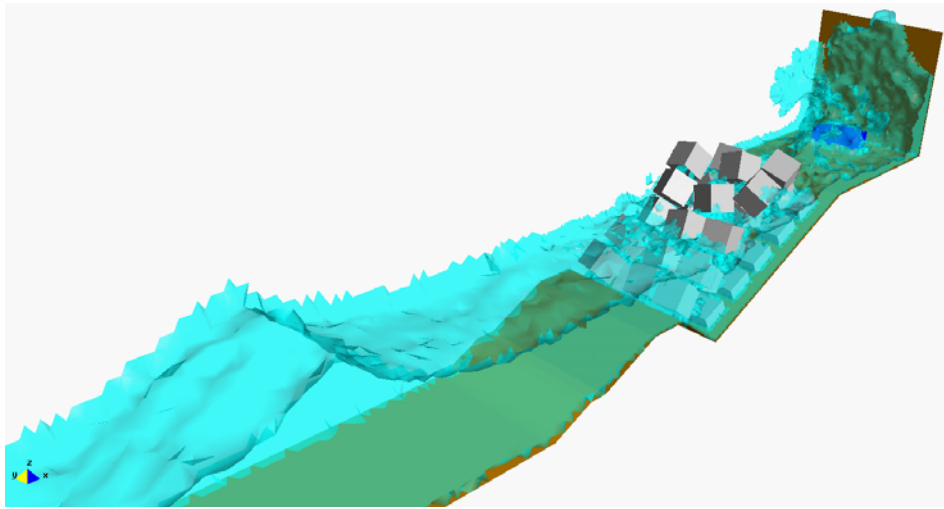


Figura 5.1c. Estudio del impacto de las olas producidas en el rebase sobre el camión (continuación).

No obstante, el caso anterior presenta los siguientes inconvenientes:

1. Estudia demasiado simplídicamente el problema
2. La malla es demasiado grosera en el objeto móvil

Habría, por tanto, que estudiar el caso de forma mucho más localizada.

Abordamos entonces una primera aproximación al estudio localizado con los parámetros siguientes:

1. Malla de 0.3 metros
2. Anchura del dique de estudio: 40 m
3. Reducción al mínimo de los efectos locales laterales de oleaje. “Dique infinito”
4. Aplicación concreta para el caso de un camión de 40 T
5. Dimensiones: 8 m de longitud y sección de 2.5x2.5 m²

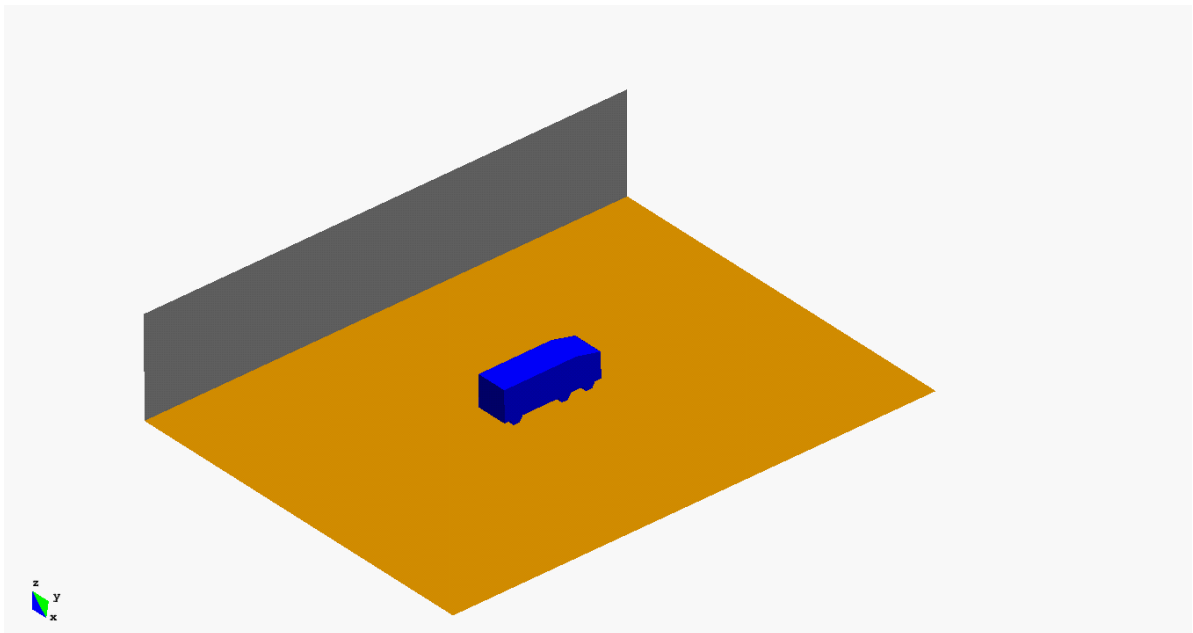


Figura 5.2a. Oleaje extraordinario de 12 m

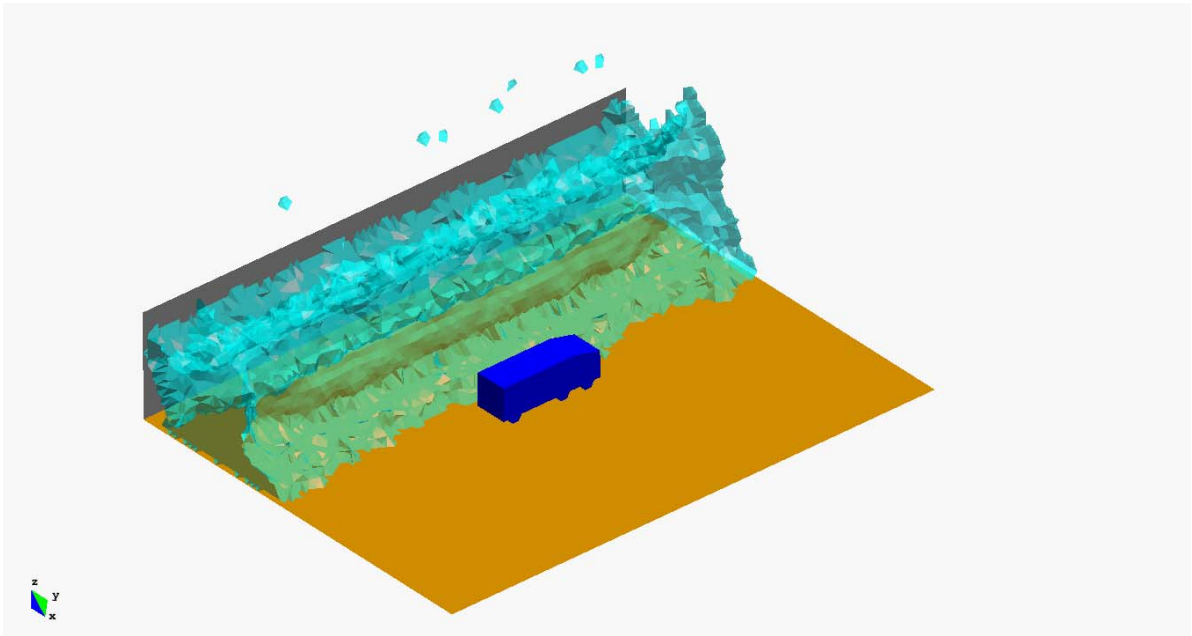
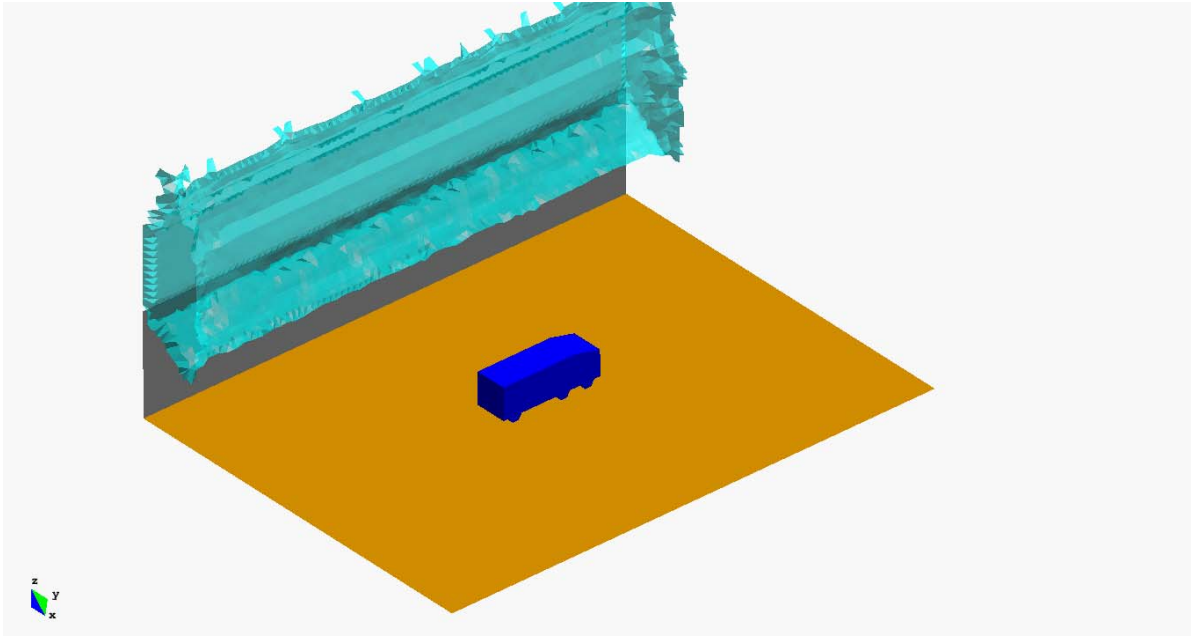


Figura 5.2b. Oleaje extraordinario de 12 m (continuación)

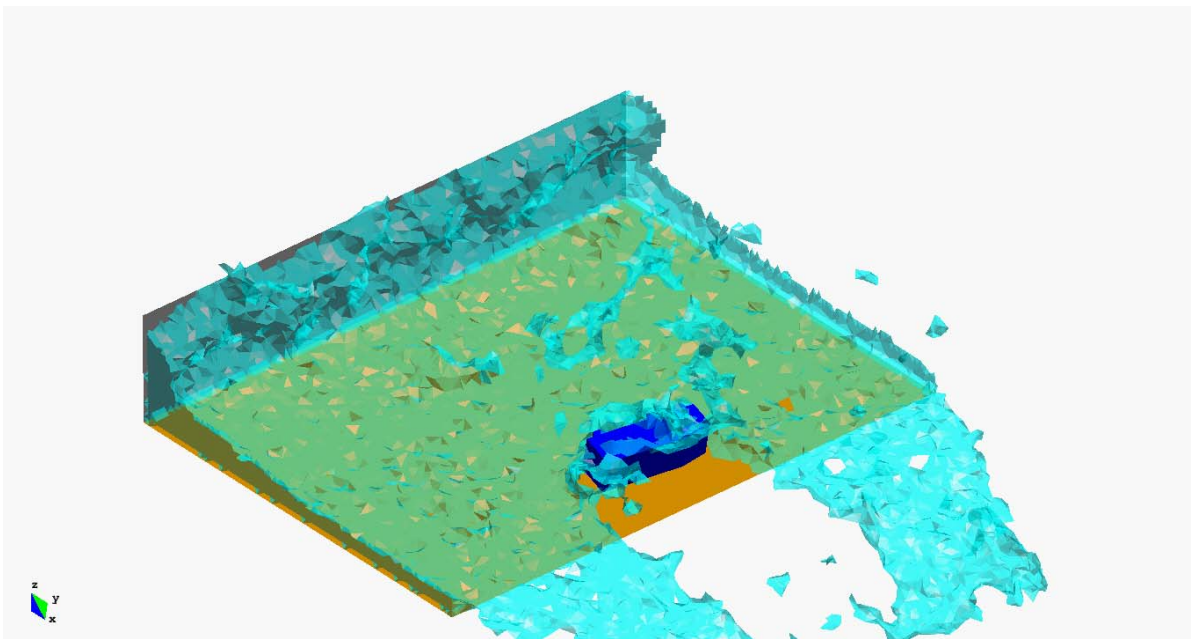
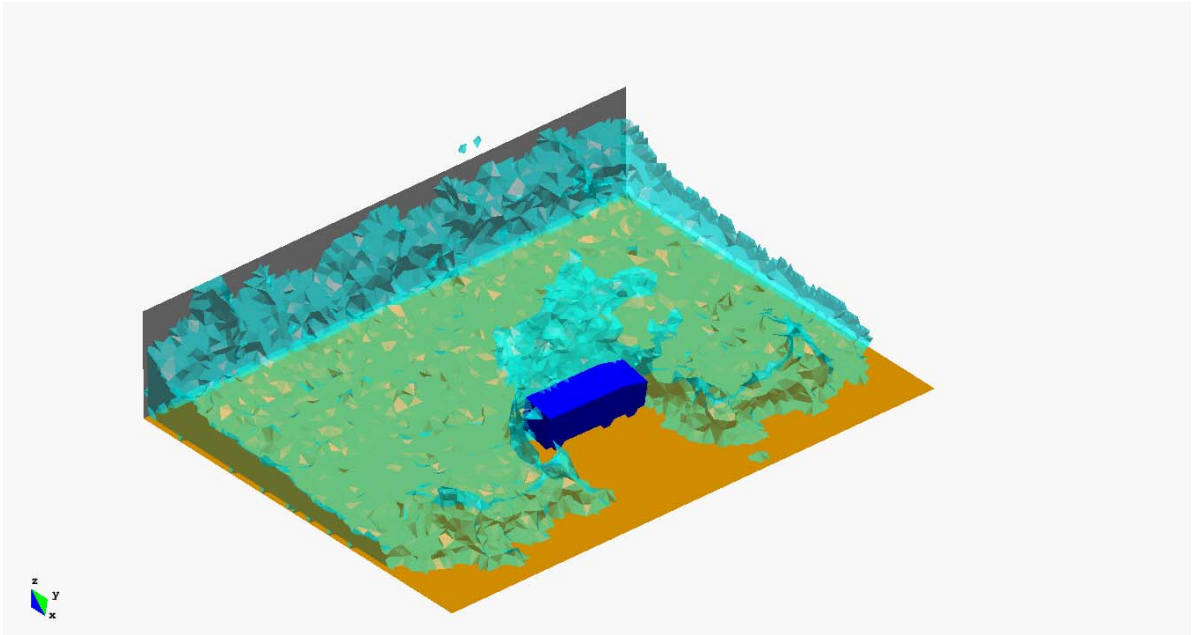


Figura 5.2c. Oleaje extraordinario de 12 m (continuación)

Se aprecia una sustancial mejora en el estudio del problema, no obstante habría que progresar aún en los siguientes puntos:

1. Malla quizás aún algo gruesa
2. Difícil paso del agua bajo el objeto de estudio
3. Subpresión de agua bajo el objeto despreciable
4. El objeto recibe momentos en los tres ejes, pero fuerzas básicamente horizontales

Se procede entonces a una segunda y definitiva aproximación al estudio del problema con los siguientes parámetros:

1. Malla de 0.1 metros o menor
2. Anchura del dique de estudio: 15 m
3. Rebases de entre 2 y 5 m, según datos experimentales
4. Los resultados alimentarán la correspondiente red neuronal

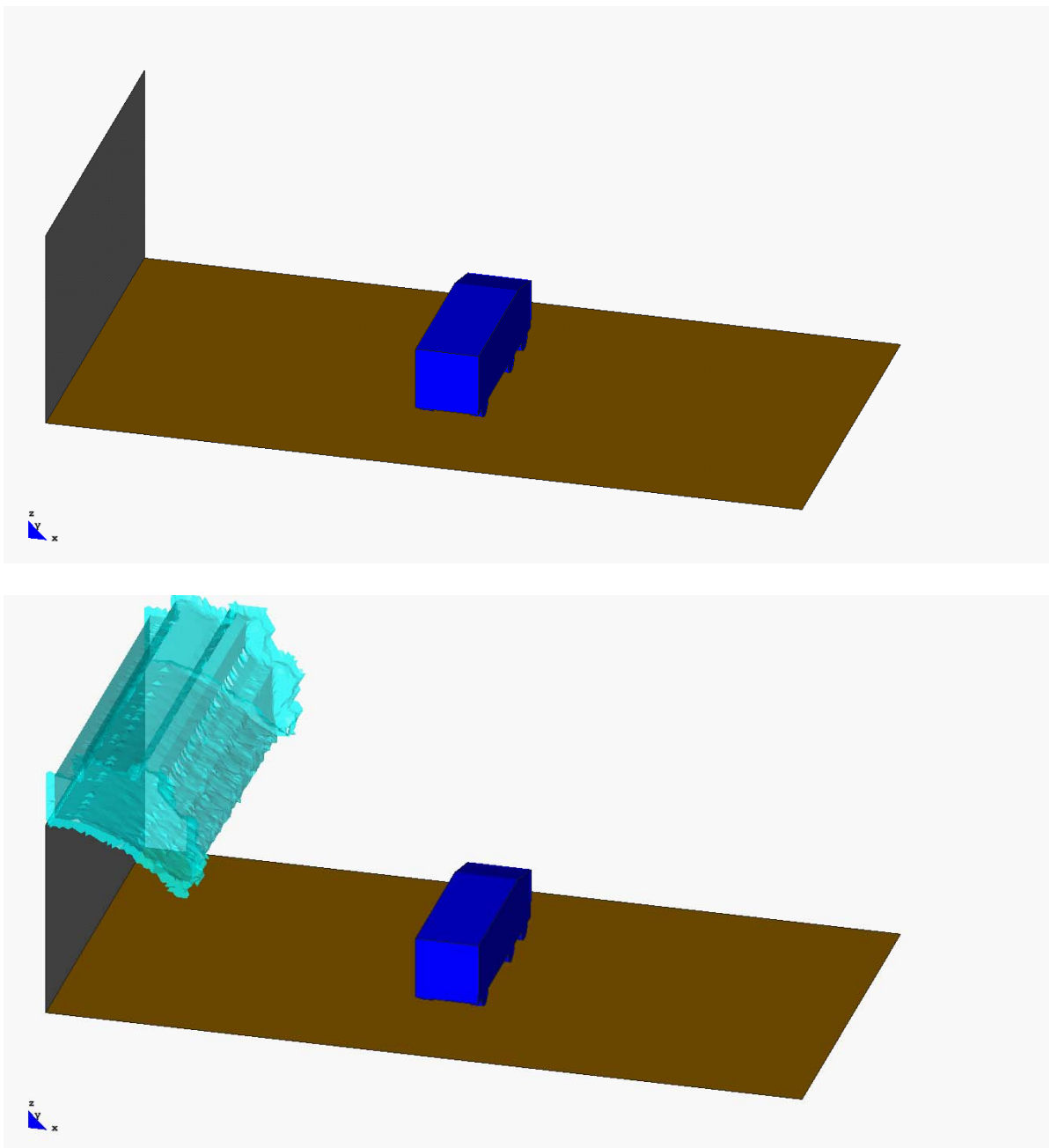


Figura 5.3a. Oleaje de 5 m

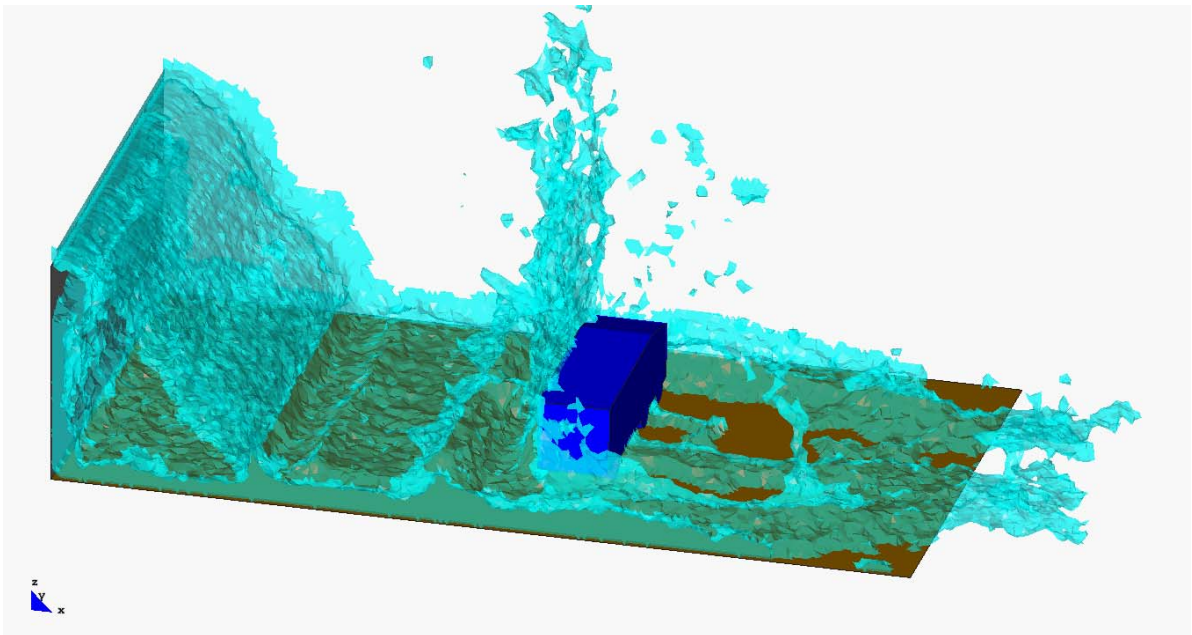
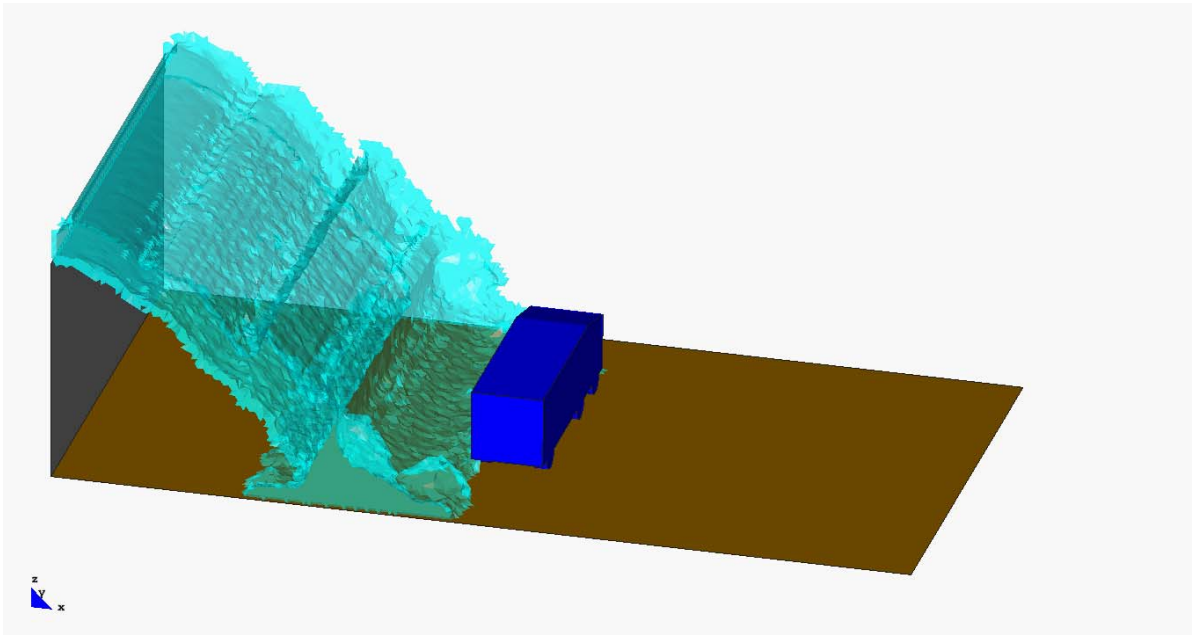


Figura 5.3b. Oleaje de 5 m (continuación)

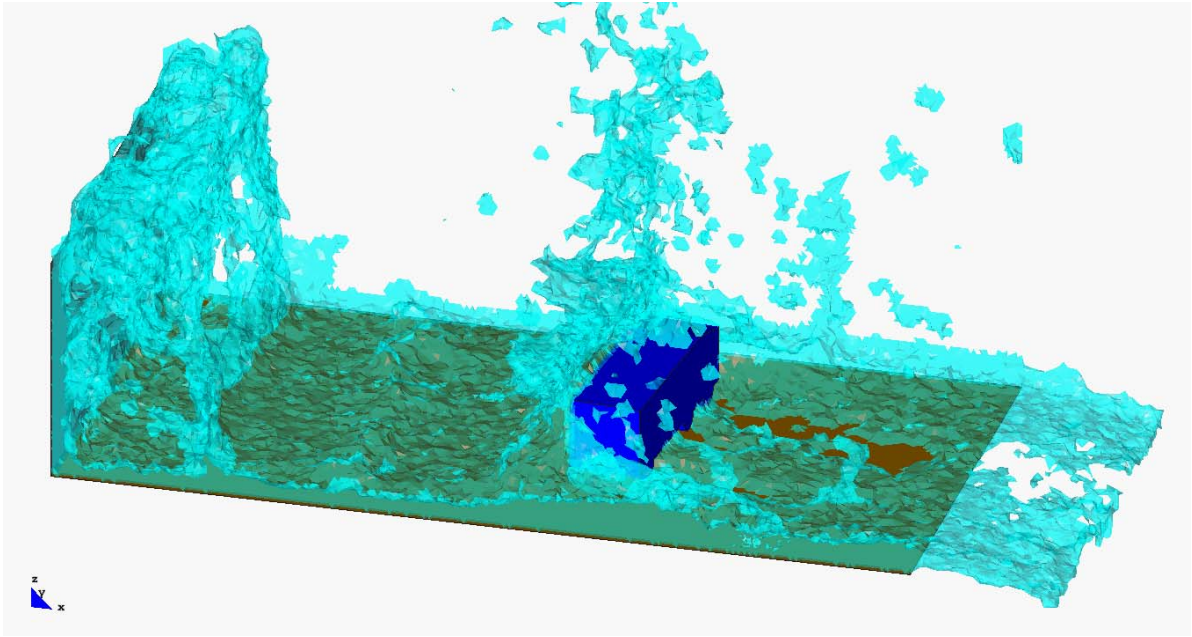


Figura 5.3c. Oleaje de 5 m (continuación)

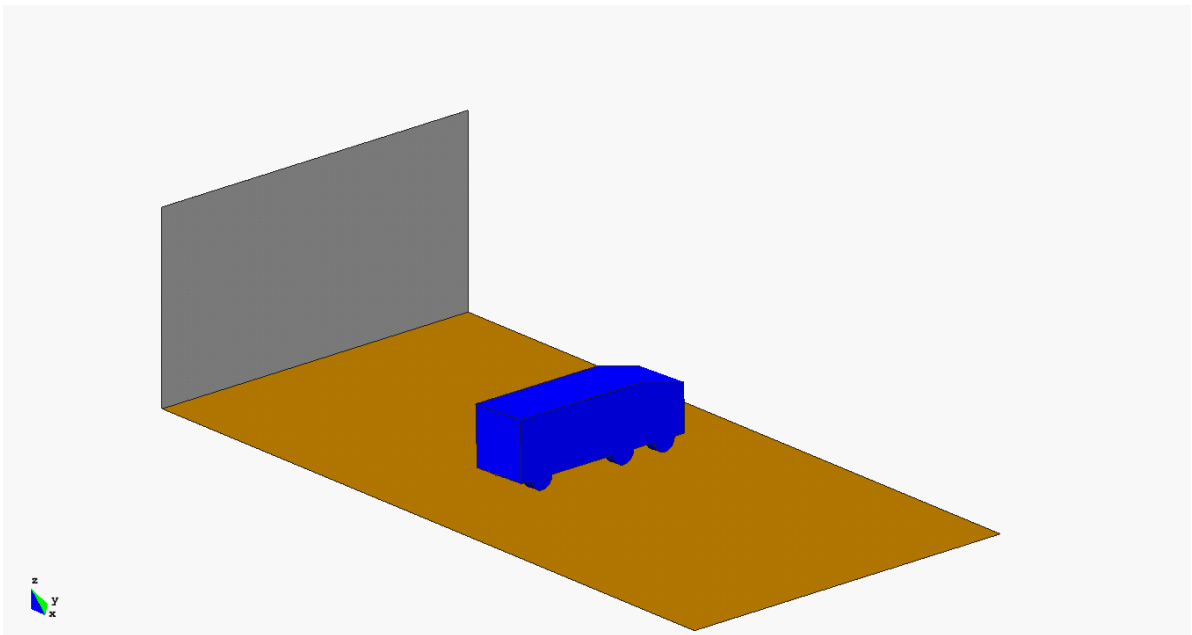


Figura 5.4a. Secuencia para el caso de rebase extraordinario de 11 metros

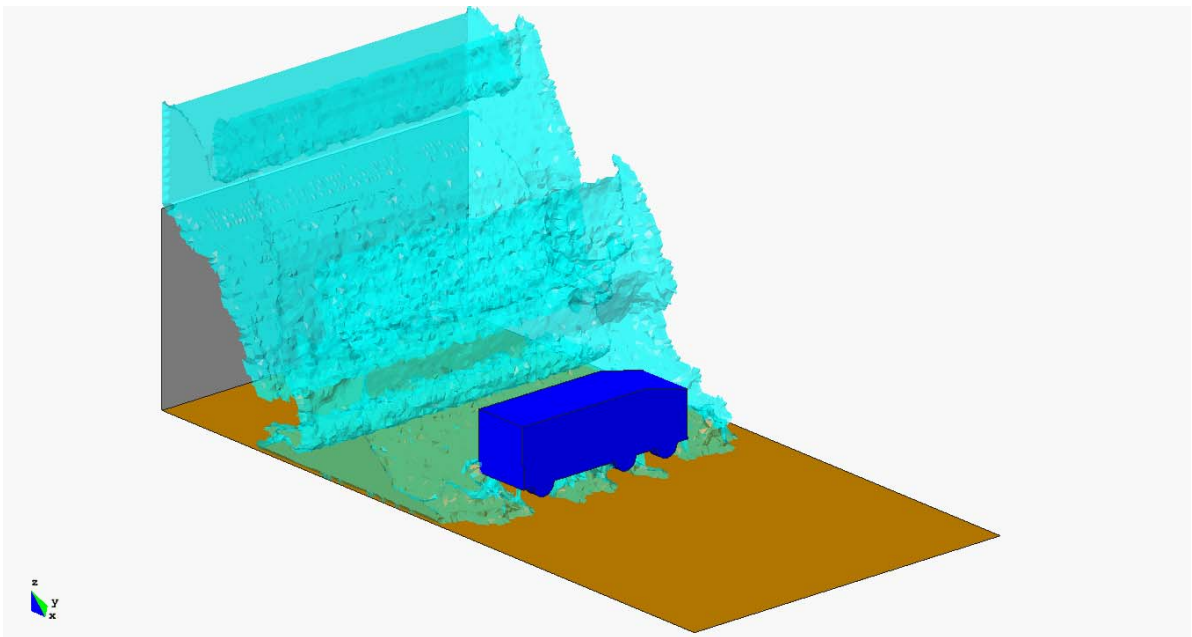
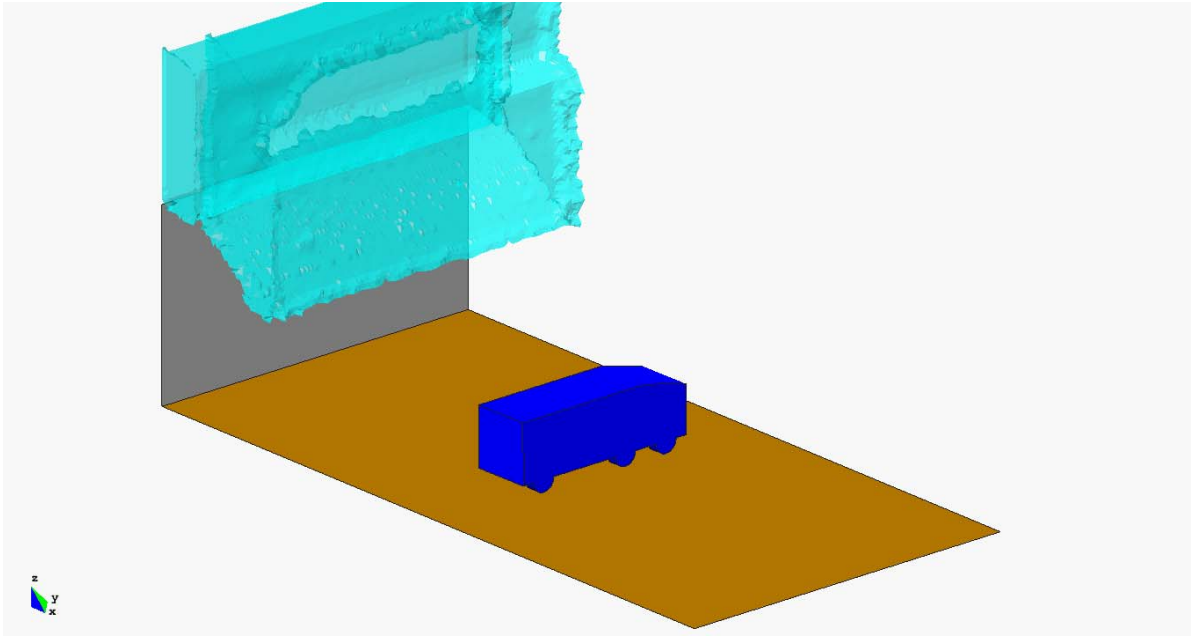


Figura 5.4b. Secuencia para el caso de rebase extraordinario de 11 metros (continuación)

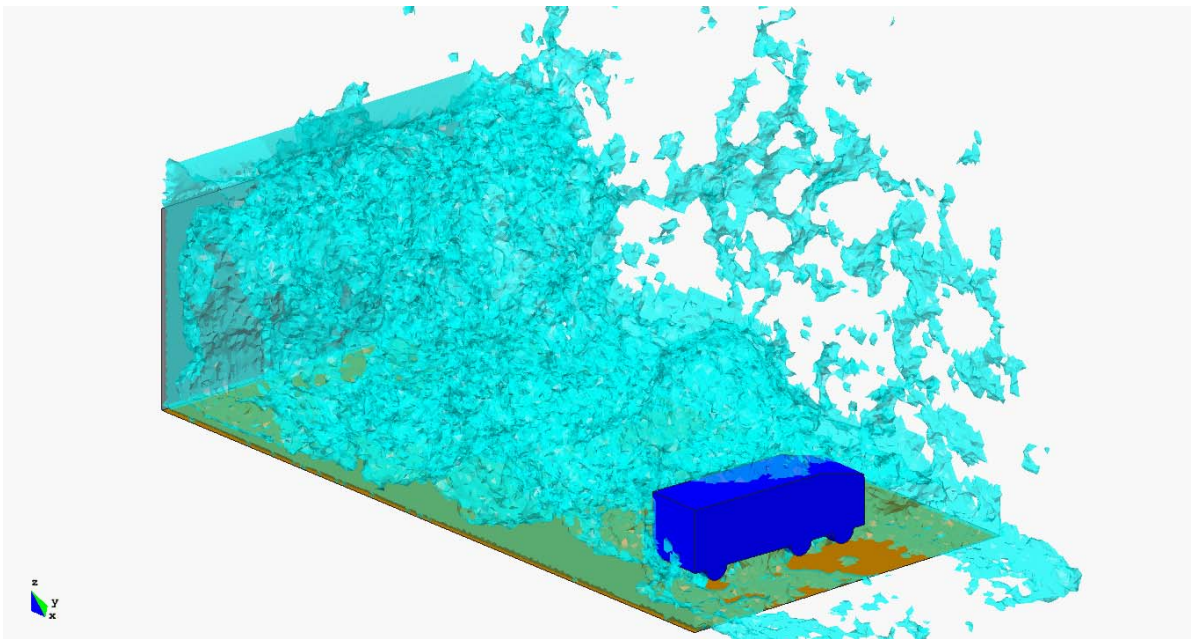
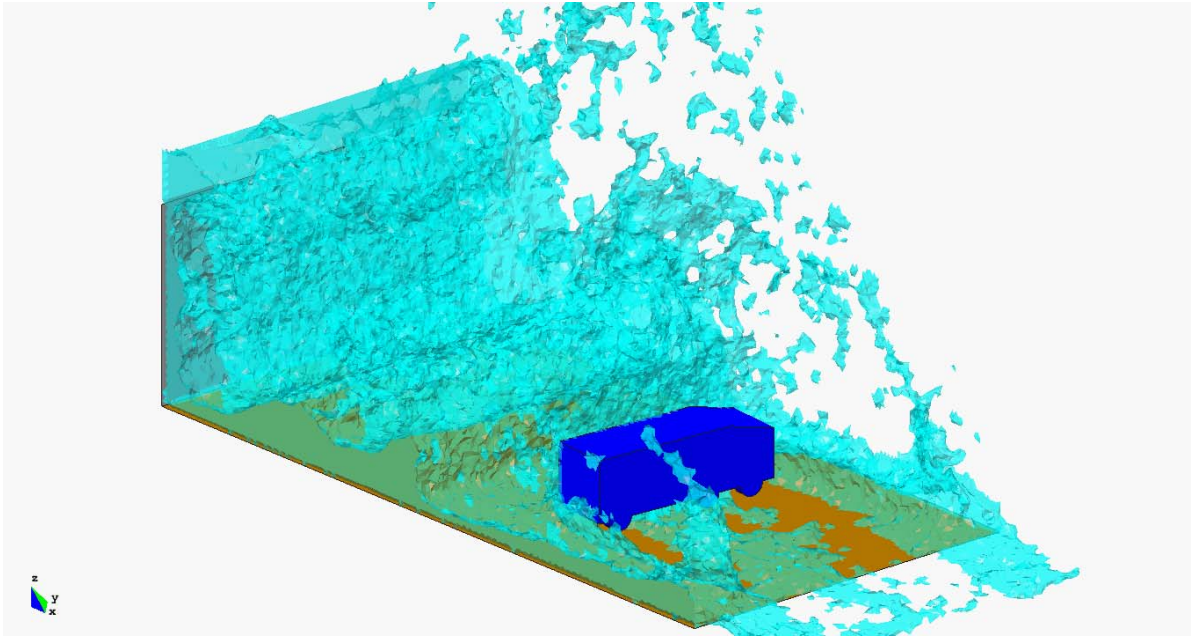


Figura 5.4c. Secuencia para el caso de rebase extraordinario de 11 metros (continuación)

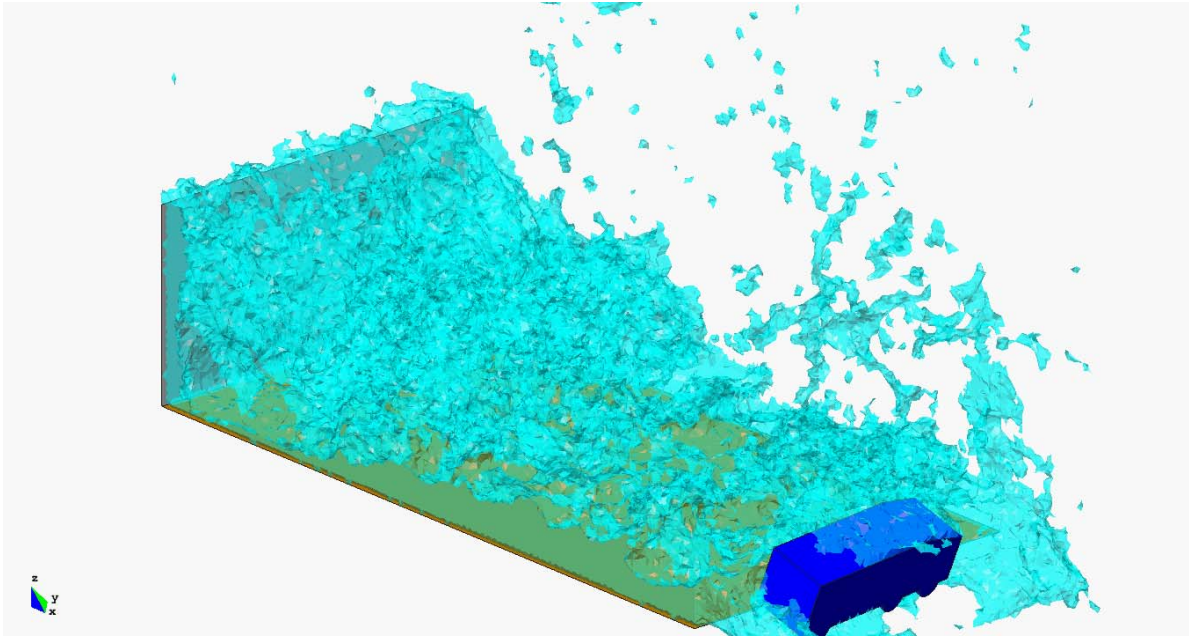


Figura 5.4d. Secuencia para el caso de rebase extraordinario de 11 metros (continuación)

Este estudio dispone de las siguientes ventajas respecto a los anteriores:

1. Malla fina
2. Permite una definición más ajustada del rebase entrante
3. Pese a reducir la anchura del dique de estudio, los efectos laterales de la masa de agua son depreciables
4. Existencia de subpresión de agua
El objeto recibe todo tipo de fuerzas y momentos

5.3 Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología original para el estudio del efecto de rebase sobre elementos de obra situados en las proximidades de la coronación de un dique.

La metodología se basa en las siguientes etapas: 1) Lectura de historias de rebases; 2) Estudio del efecto del rebase sobre un elemento de obra utilizando la técnica PFEM.

La aplicación del PFEM permite obtener las fuerzas y movimientos inducidos por el rebase sobre el elemento de obra seleccionado.

Esta técnica es útil para predecir la seguridad de elementos de obra durante las fases de construcción y explotación de una obra marítima. La metodología desarrollada es la base para el desarrollo de un sistema experto para ayuda a la predicción de la seguridad de elementos de obras marítimas sometidas a la acción de rebases.

6. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE UN ESTADO DE MAR SOBRE SECCIONES DE UN DIQUE EN ETAPAS CONSTRUCTIVAS Y DEFINITIVAS

6.1 Definición de una metodología para estudio de la estabilidad del manto de diques emergidos

6.1.1 Introducción

El objetivo de esta tarea es el desarrollo de una metodología de análisis de la estabilidad de los diques de bloque ante los efectos producidos por un oleaje perpendicular a su eje. El desarrollo de la técnica PFEM permite conocer el efecto que produce un oleaje con unas características determinadas sobre las estructuras portuarias. Generando la geometría del dique, una región suficiente de mar y un elemento generador de olas, PFEM calcula la presión que se ejerce sobre cada punto del dique. Por otra parte, el código tiene la posibilidad de calcular el movimiento de sólidos bajo la fuerza del oleaje.

Teniendo en cuenta las capacidades de la técnica PFEM, y sus limitaciones, se ha desarrollado una metodología de estudio para conocer las condiciones de estabilidad de un dique con unas determinadas características frente a diferentes estados de mar. Básicamente, consiste en los siguientes pasos:

A partir de los casos previamente estudiados de oleajes incidentes en diques, se procede al análisis de las velocidades y calados asociados que se generan en el entorno de la capa exterior del dique.

Estudio de la velocidad crítica, entendiendo como tal la de inicio de la inestabilidad de los bloques del manto. Este análisis se realiza sobre casos con geometrías simplificadas.

Comparación de las velocidades generadas por los diferentes estados de mar con las que provocan inestabilidad, para extraer conclusiones acerca del diseño de un dique, o sobre el nivel de avería esperado frente a un temporal determinado.

El estudio se ha estructurado en dos partes. En un primer lugar, se ha aplicado el esquema propuesto para el caso concreto de un cubo aislado de 150 T. Se trataba de comprobar la viabilidad del método y la capacidad de PFEM para obtener los resultados necesarios.

En una segunda fase, se ha aplicado la metodología desarrollada al análisis de diferentes configuraciones de un conjunto de cubos 3D, se han extraído conclusiones sobre la estabilidad en cada caso, y los resultados se han comparado con los obtenidos en el caso anterior.

6.1.2 Estudio de la estabilidad de un bloque aislado

Se trata de una primera aproximación al caso de estudio. Se sitúa un cubo sobre una pendiente plana y se le somete a una corriente de agua. Esta corriente hará el papel de la fase de resaca del oleaje. Además, el cubo tendrá coaccionado el movimiento en su esquina inferior aguas abajo, que actuará como charnela.

Se somete entonces al objeto a distintas corrientes de agua de crecientes velocidades iniciales de flujo de agua. Se estudiará el caso para geometrías tanto bidimensionales como tridimensionales y para taludes de 20 y 27 grados. Los parámetros anteriores han sido elegidos teniendo en cuenta los resultados observados en las simulaciones del capítulo anterior.

6.1.2.1. Caso bidimensional

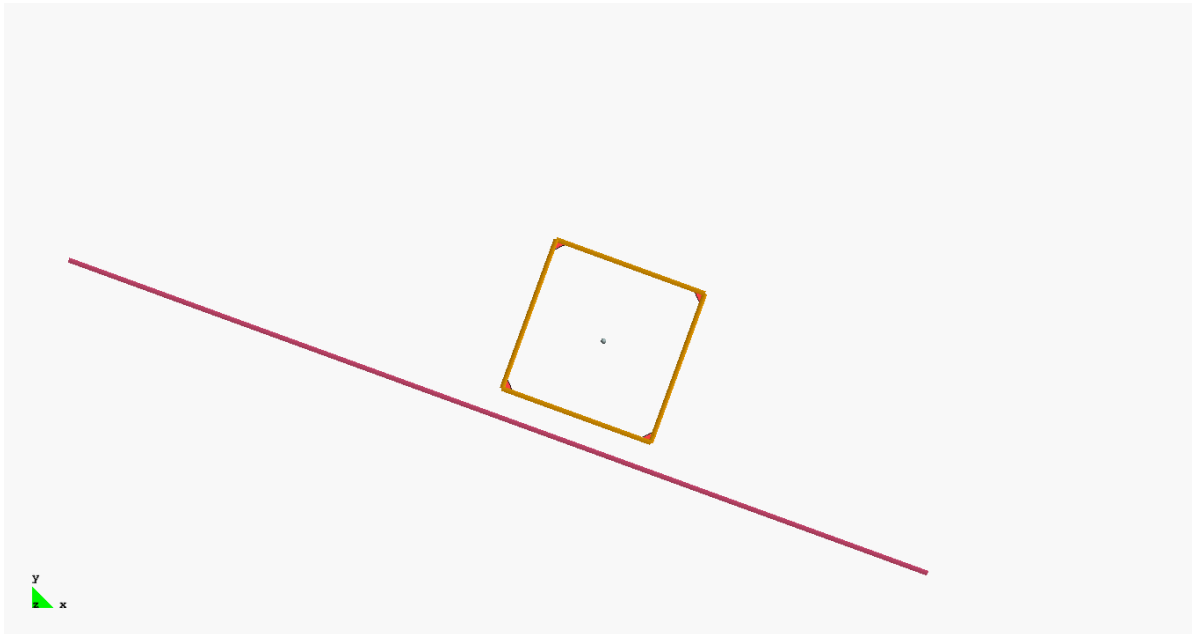


Figura 6.1a. Secuencia de diapositivas para el caso bidimensional

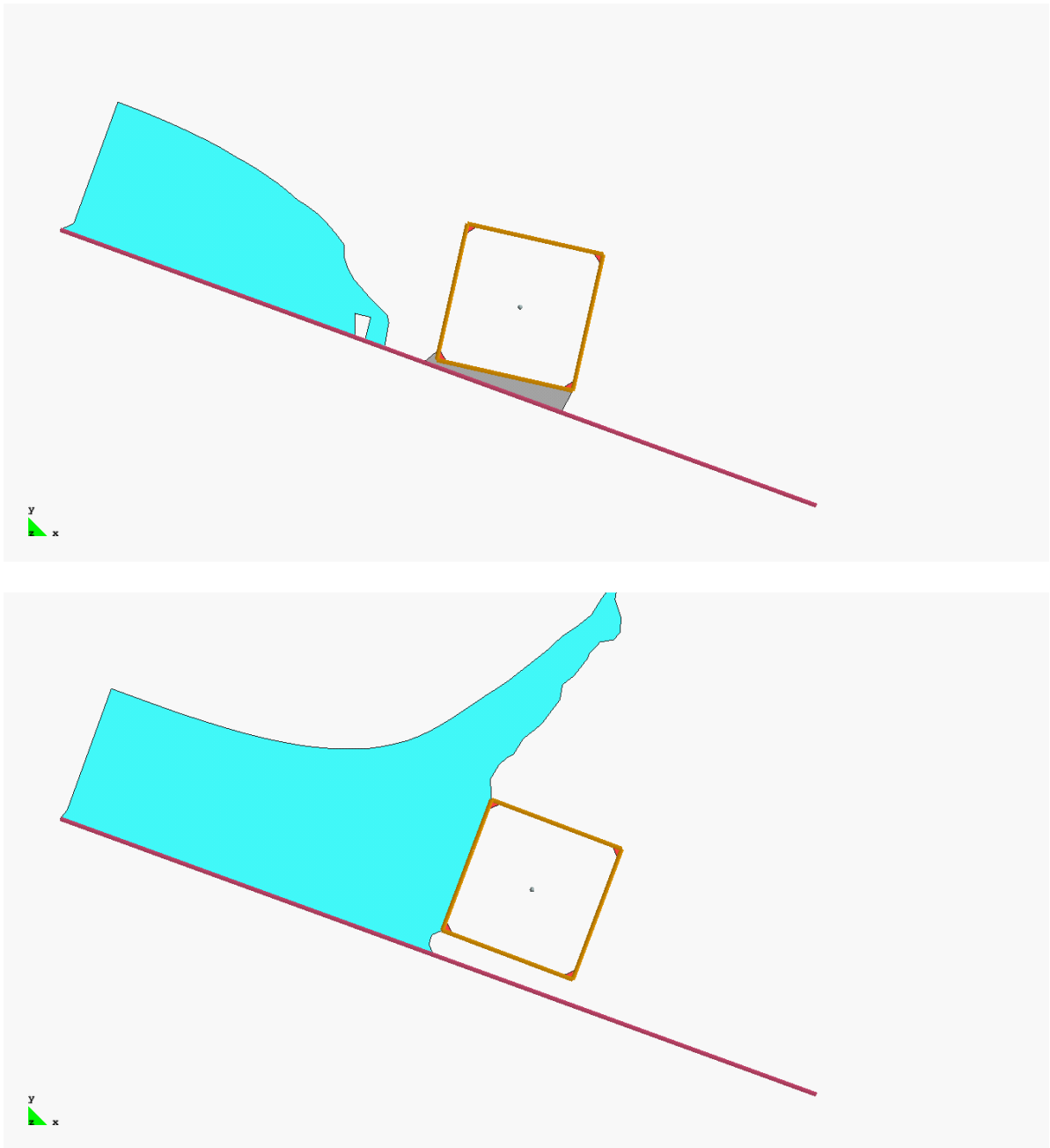


Figura 6.1b. Secuencia de diapositivas para el caso bidimensional (continuación).

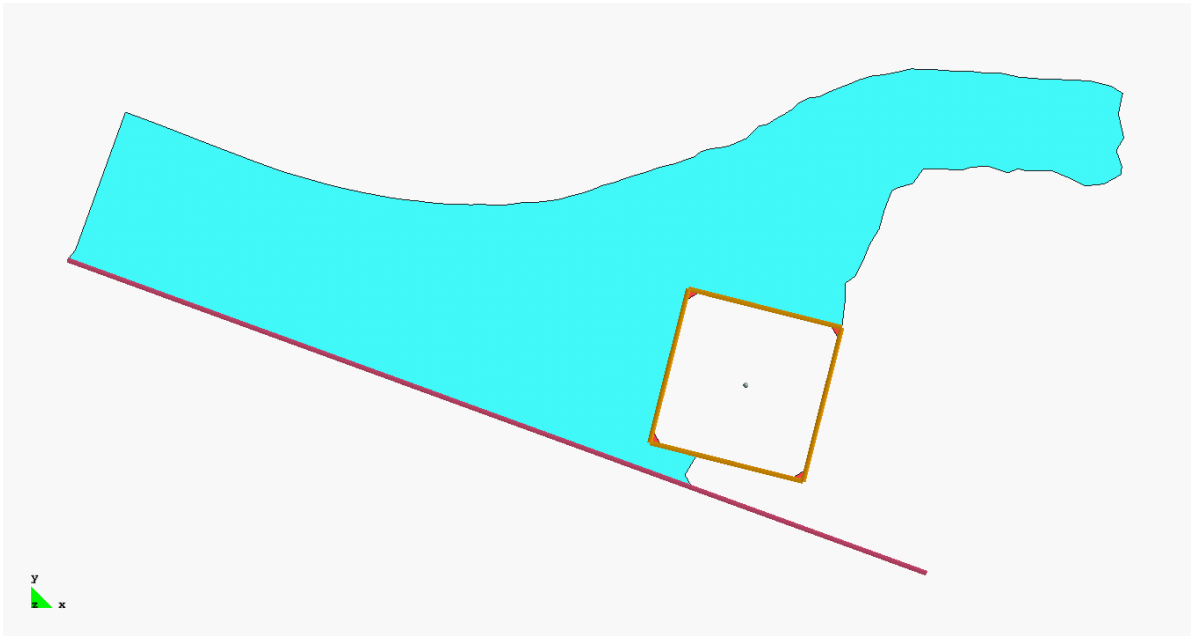
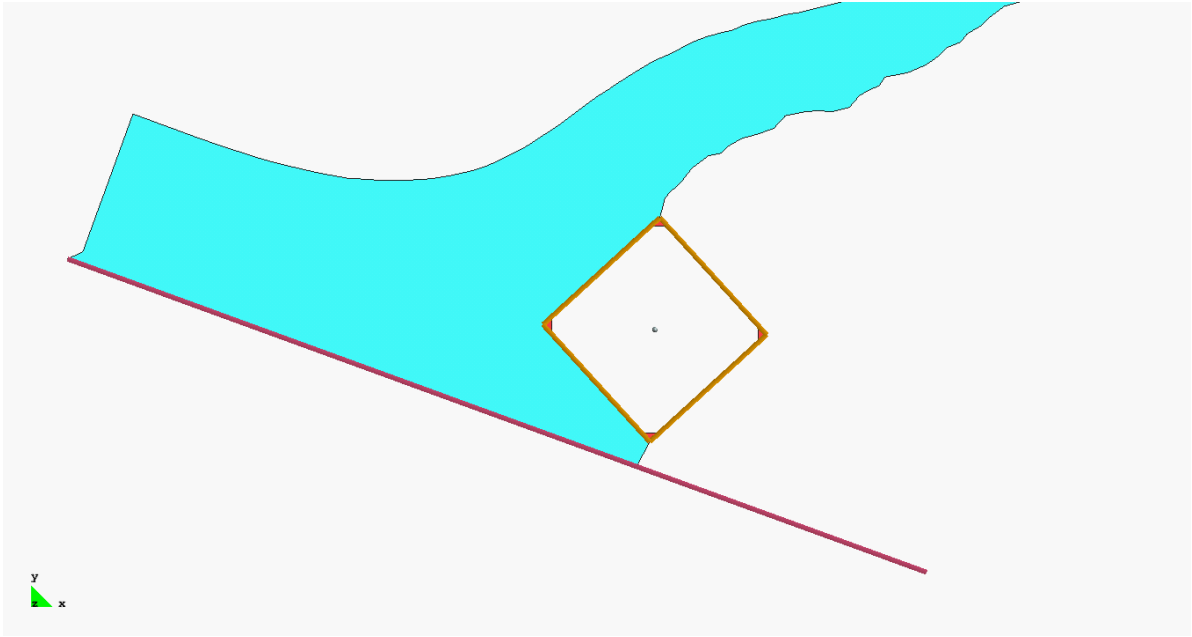


Figura 6.1c. Secuencia de diapositivas para el caso bidimensional (continuación).

6.1.2.2. Caso tridimensional

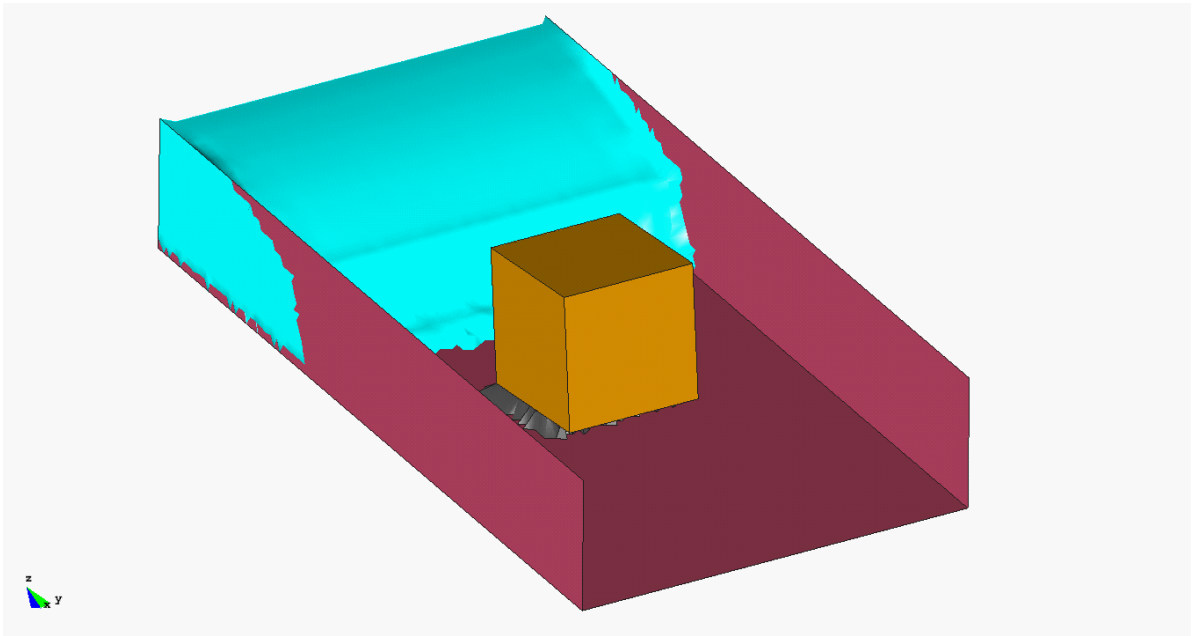
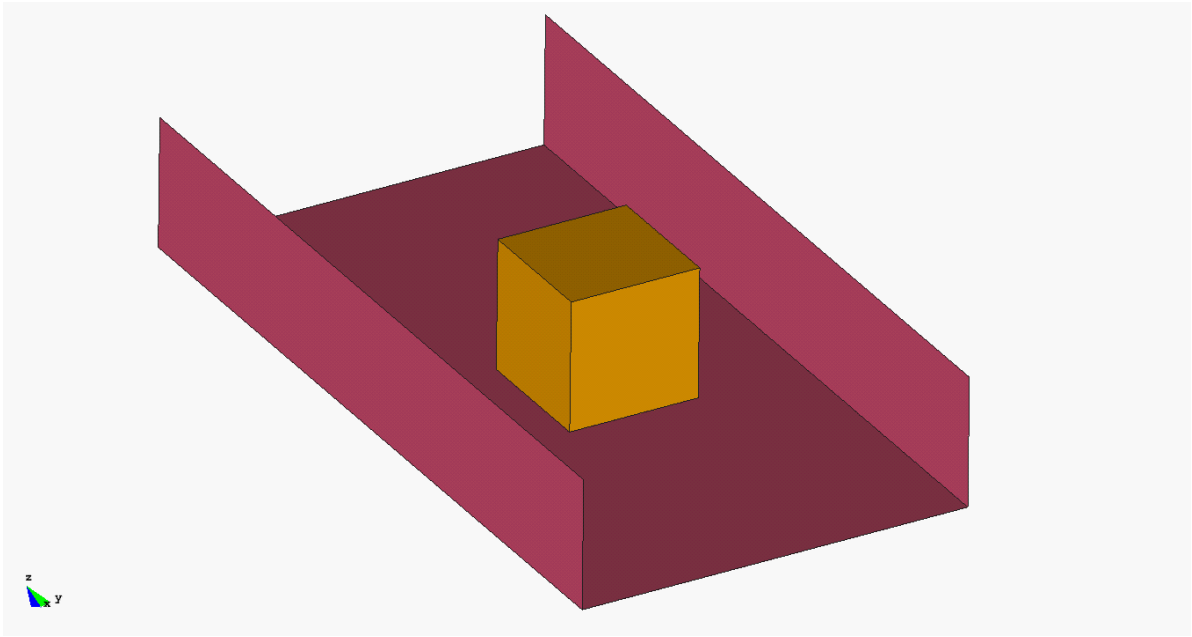


Figura 6.2a. Secuencia de diapositivas para el caso tridimensional

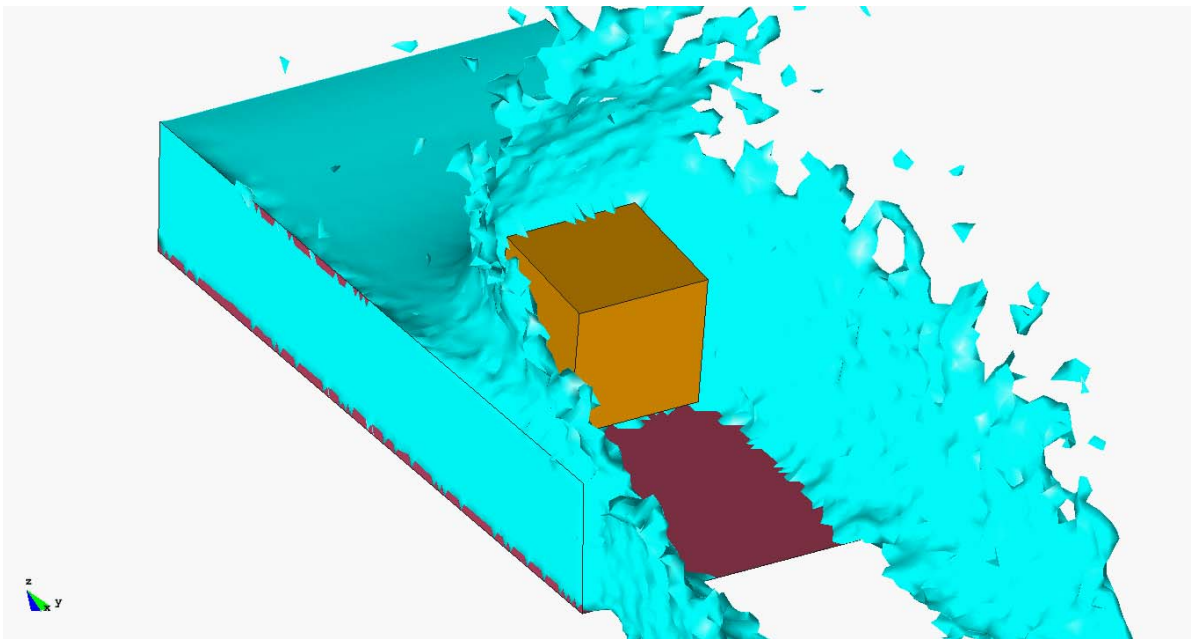
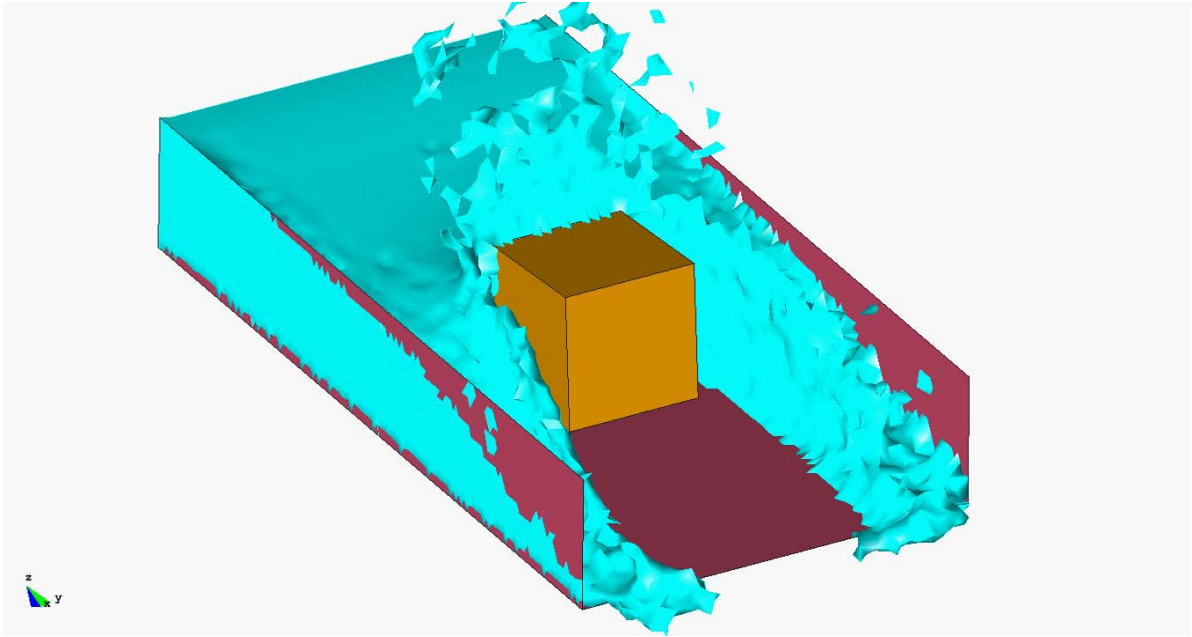


Figura 6.2b. Secuencia de diapositivas para el caso tridimensional (continuación).

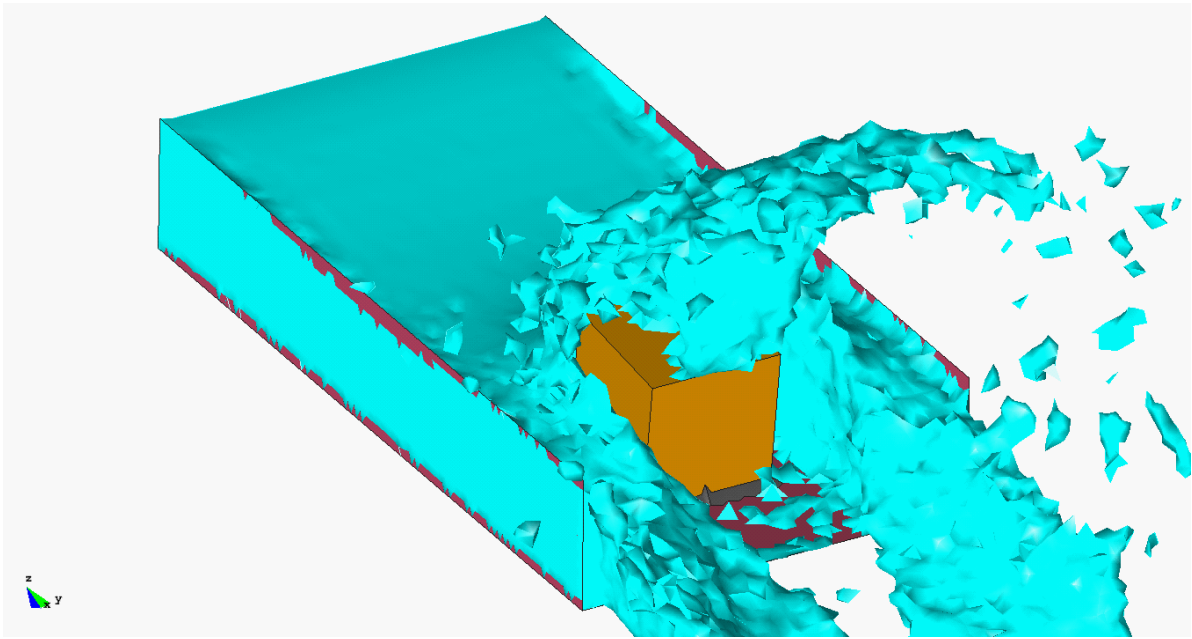
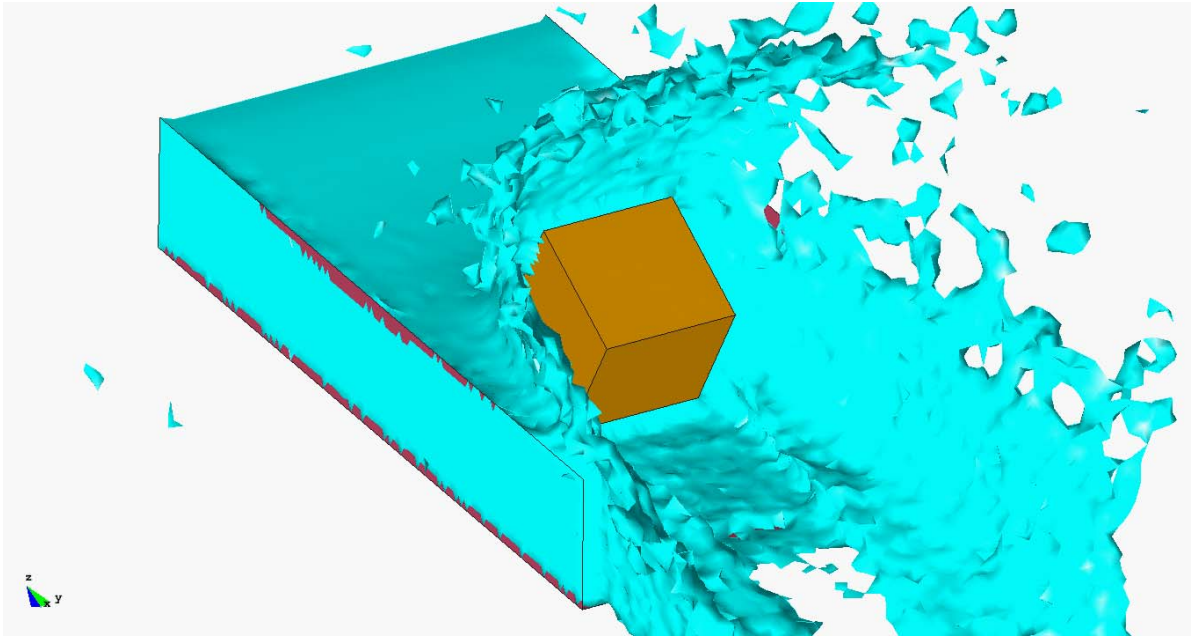


Figura 6.2c. Secuencia de diapositivas para el caso tridimensional (continuación).

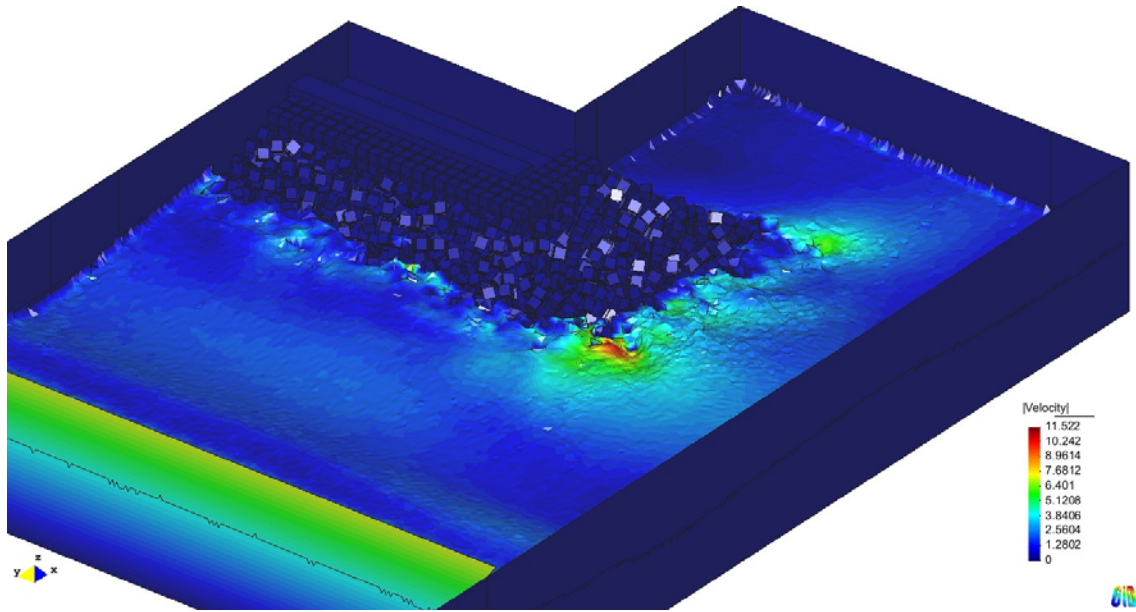


Figura 6.3. Campo de velocidades para el dique de invernada.

Geometría 2D		Talud 20°	Talud 27°
Velocidad (m/s)	6	Estable	Estable
	8	Estable	Inestable
	10	Inestable	Inestable
Geometría 3D			
Velocidad (m/s)	6	Estable	Estable
	8	Estable	Inestable
	10	Inestable	Inestable

Tabla 6.1. Tabla comparativa entre los resultados 2D y 3D

6.1.3 Estudio de viabilidad. Aplicación a bloques de 150 T

Las características geométricas del dique utilizado que intervienen a efectos del cálculo de la estabilidad de los bloques son las siguientes:

Pendiente del talud sobre el que se colocan los bloques: 2H:1V.

Densidad del hormigón de los bloques: 2,30 t/m³.

Peso del bloque: 150 t.

Geometría: hexaédrica.

Colocación: estable estáticamente al inicio del cálculo.

Se evitará la colocación completamente concertada (adoquinado).

No puede haber elementos cuyas puntas sobresalgan de un plano paralelo al teórico del talud exterior y distante de él un 40 % de la diagonal del cubo.

Se han elaborado modelos de los casos de estudio definidos por las variables del apartado anterior. Para ello, se ha utilizado el programa GiD, en el cual está implementado el código PFEM desarrollado. GiD permite definir la geometría, generar la malla inicial y fijar las condiciones de contorno del cálculo con facilidad.

Hay infinitas posiciones en que se puede colocar un bloque cumpliendo las condiciones dadas, por lo que es imprescindible adoptar algunas simplificaciones.

La inestabilidad de los bloques se produce en la fase de resaca, cuando la ola se retira y genera fuertes velocidades del agua en dirección mar en el entorno del dique. En esta situación, parece claro que la presión tiene una influencia menor, ya que, siempre que un bloque se encuentre sumergido, la diferencia de presiones hidrostáticas entre sus extremos superior e inferior es la misma, independientemente de la altura de ola.

Un efecto que favorece la retirada del bloque, y que se considera que debe tenerse en cuenta, es la subpresión que se produce por el agua que circula por el interior del manto.

Teniendo en cuenta los calados representativos obtenidos en las simulaciones previas, se procede al análisis detallado de la estabilidad de los bloques colocados en distintas posiciones. Ya se ha explicado que hay infinitas posiciones en que puede situarse un bloque cumpliendo las condiciones de puesta en obra. Para obtener resultados prácticos, se ha planteado el trabajo buscando definir un valor umbral de la velocidad del agua en el entorno del dique a partir del cual es posible que se produzca la inestabilidad de algún bloque. Lógicamente, para una velocidad determinada, que un bloque sea o no inestable depende de su posición y de la interacción con los bloques adyacentes. Para determinar este umbral se han estudiado las colocaciones más desfavorables que cumplen las prescripciones.

Para terminar de definir los casos simplificados, debe establecerse la forma en que se considera la acción del agua. Se trata de hacer que los escenarios representen la acción del oleaje, simplificando al máximo número de elementos y tiempo de simulación, de modo que se ahorra tiempo de computación, con lo que se pueden estudiar mayor número de casos. Se ha concluido que la forma mejor consiste en partir de una situación inicial con agua entre los

bloques y por encima hasta una altura determinada. Durante el cálculo el agua se mueve bajo la acción de la gravedad, con lo que se va acelerando. Se ha considerado esta forma de introducir el agua como una forma sencilla de representar la acción de las olas.

Ya se ha explicado que la inestabilidad de los bloques se produce durante la fase de resaca. Este movimiento del agua hacia el lado mar parte de una situación inicial de velocidad nula, cuando el movimiento del fluido pasa de dirigirse hacia el dique a dirigirse de nuevo hacia el mar. Con ello además la velocidad del agua en el entorno del bloque es creciente desde un valor nulo, de modo que de cada caso de estudio puede extraerse el valor de la velocidad a partir del cual comienza la inestabilidad, en su caso (en algunos de los cálculos los bloques han resultado estables).

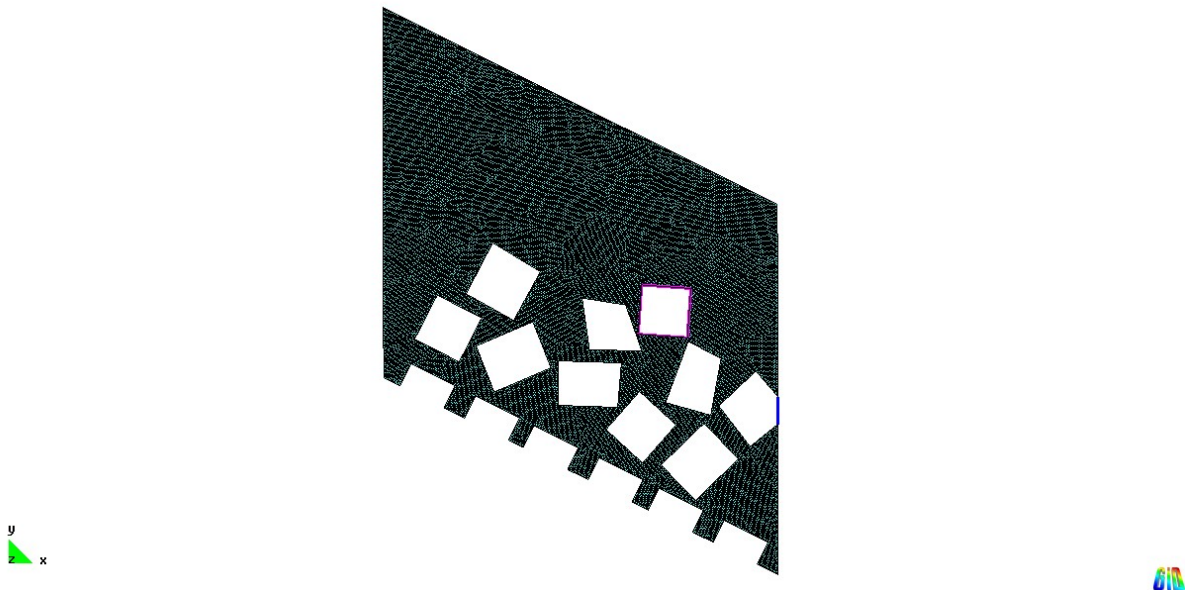


Figura 6.4. Geometría de uno de los casos 2D.

Además de los casos en dos dimensiones, y a modo de comprobación, se han elaborado unos modelos en 3D. La metodología seguida es básicamente la misma. En este caso, se ha tomado una zona de la geometría del dique en 3D utilizada en fases anteriores para otros cálculos. Para la definición del modelo, se han seguido dos criterios fundamentales: 1) que reproduzca lo más fielmente posible la situación real y 2) que la geometría sea lo más simplificada posible. Así, se consigue realizar una batería de casos en un tiempo razonable.

Los modelos utilizados se definen a partir de la geometría del manto inferior, sobre la que se apoyan varios cubos fijos en situación aleatoria. Sobre éstos se colocan los cubos cuya estabilidad se quiere estudiar. Se ha buscado también que la interacción con los bloques de apoyo represente un caso representativo de cubos reales colocados en situación desfavorable dentro de las tolerancias exigidas.

La siguiente figura muestra la geometría inicial de uno de los casos estudiados.

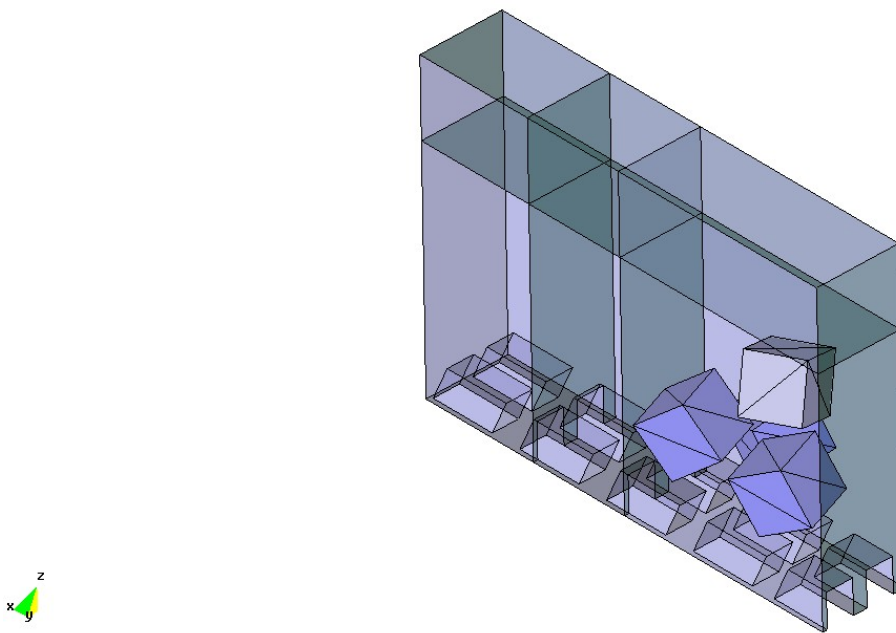


Figura 6.5. Geometría de uno de los casos 3D.

Finalmente, mediante comparación de las velocidades críticas de inestabilidad con las máximas obtenidas en los casos previos, puede conocerse si la sección es estable, y tener una idea del grado de avería esperable, en función de la diferencia entre las velocidades máximas del agua producidas por el oleaje y las críticas.

Estabilidad en 3D

Para comprobar que los valores obtenidos representan bien el caso real, se ha ejecutado otra serie de cálculos simplificados en tres dimensiones. Estos casos representan mejor la situación real del dique, la geometría de los cubos, y la forma en que circula el agua por el interior del manto, entre los bloques.

Se han realizado secciones por planos paralelos al X-Z. De este modo se compara el movimiento del agua en un caso 3D sobre el mismo plano sobre el que se han hecho los modelos 3D.

Una primera conclusión que se puede extraer del análisis de los resultados de estos cálculos es que, como era de esperar, la estabilidad del bloque aumenta de manera apreciable al introducir el efecto de apoyo en más de un punto, es decir, en varios bloques. Así, la gran mayoría de los casos analizados han resultado estables.

Se ha conseguido un caso de cubo inestable (cumpliendo las condiciones de colocación exigidas en obra). En dicho caso, en el instante de inicio de la inestabilidad se registró una velocidad de 12.59 m/s, con una velocidad horizontal de 12.10 m/s.

En la Figura siguiente se muestra la secuencia de imágenes del inicio y desarrollo de la inestabilidad del bloque en este caso. Se representa una sección por un plano perpendicular al talud.

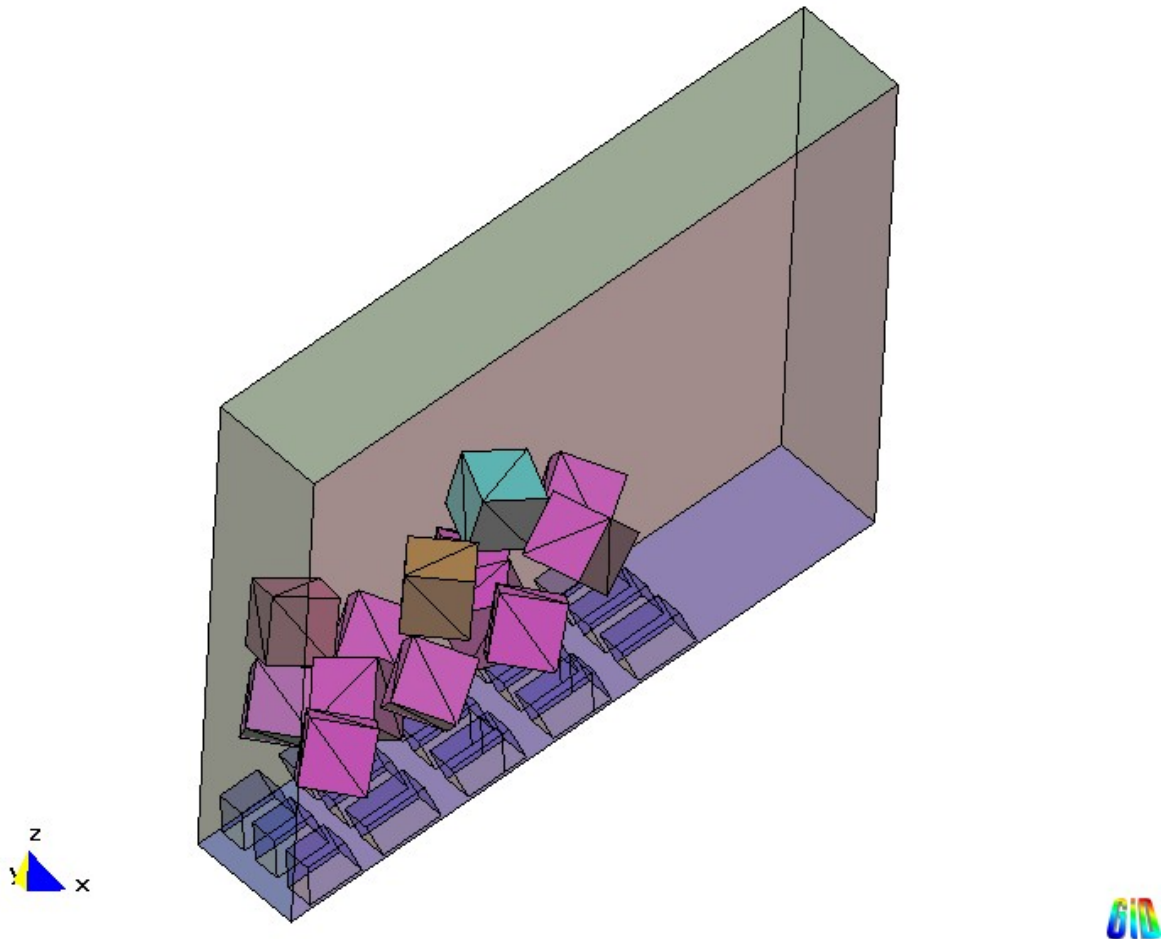


Figura 6.6. Geometría de los casos 3D.

Para el análisis de la velocidad crítica de arrastre en los casos 3D se han realizado diferentes cortes transversales al modelo en la situación de inicio de la inestabilidad. La Figura 6.7 muestra el resultado en uno de estos casos.

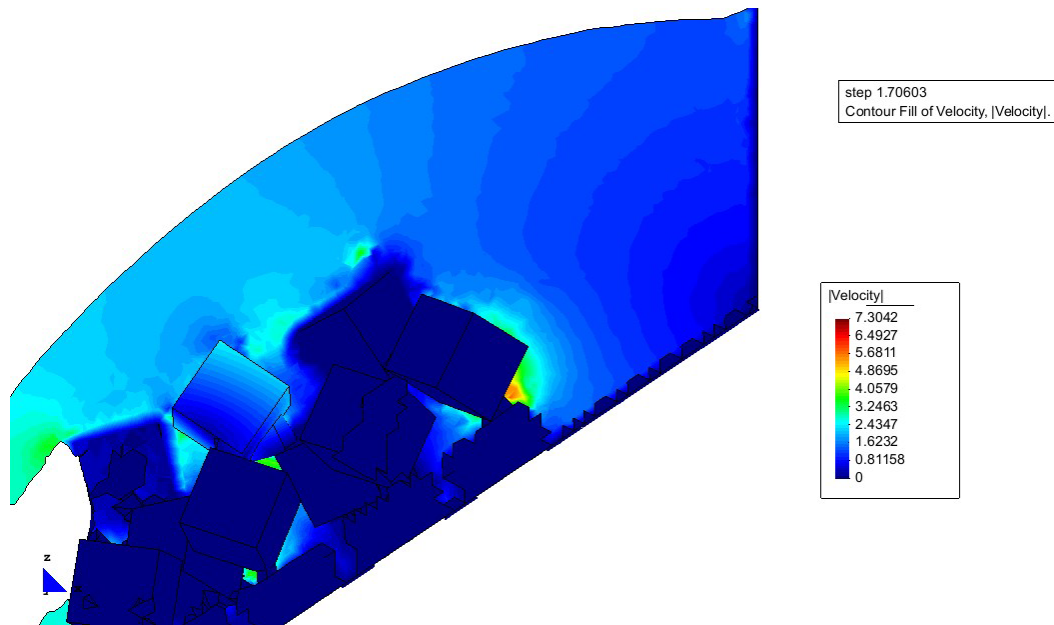


Figura 6.7. Análisis de resultados de los casos 3D.

A continuación se presentan los resultados obtenidos. Al analizar las velocidades máximas en cuanto a módulo, se han seleccionado únicamente los máximos que se producen en **fase de resaca**. Para ello se han analizado los resultados de velocidad en dirección horizontal, que lógicamente tienen signo. El resto de gráficos se incluyen en el anexo.

En las simulaciones previas se obtiene aproximadamente la siguiente relación entre Hs y velocidad máxima:

Hs (m)	V-máx (m/s)
6.5	10
7.0	12
8.0	14

Tabla 6.2. Velocidades máximas generadas por el oleaje en los distintos casos.

Ya se ha comentado en otros apartados que la velocidad de inicio de la inestabilidad depende de manera importante de la situación del cubo en relación con los adyacentes. En todos los casos estudiados se han situados los cubos de forma compatible con las prescripciones de colocación en obra, evitando que sobresaliera más de lo admitido. Sin embargo, el cumplimiento de esa condición no acota demasiado el enorme abanico de posibilidades de situación de los cubos. Ello explica que se hayan obtenido resultados variables, con muchos de los casos estables. Se han seleccionado algunos resultados que se consideran más representativos. En las figuras siguientes se muestran los resultados de los diferentes casos. Los colores indican el módulo de la velocidad.

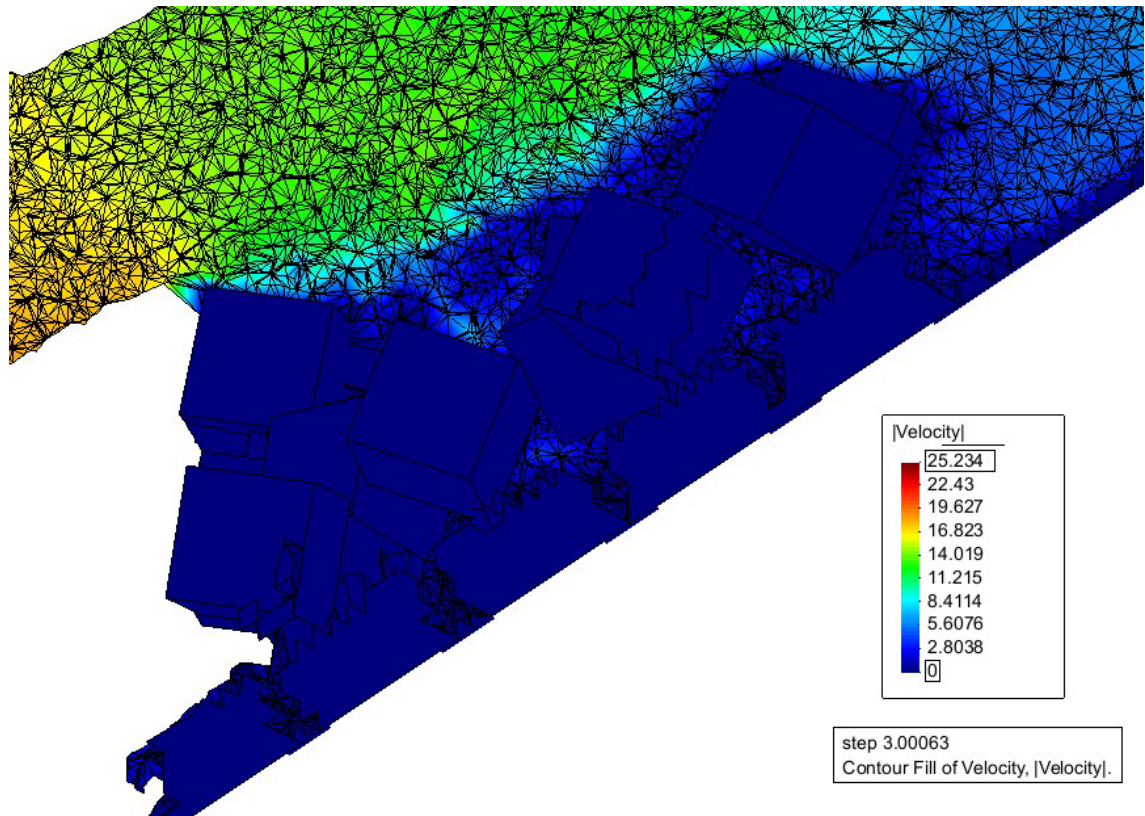


Figura 6.8. Caso estable ($V_{máx} \approx 16$ m/s)

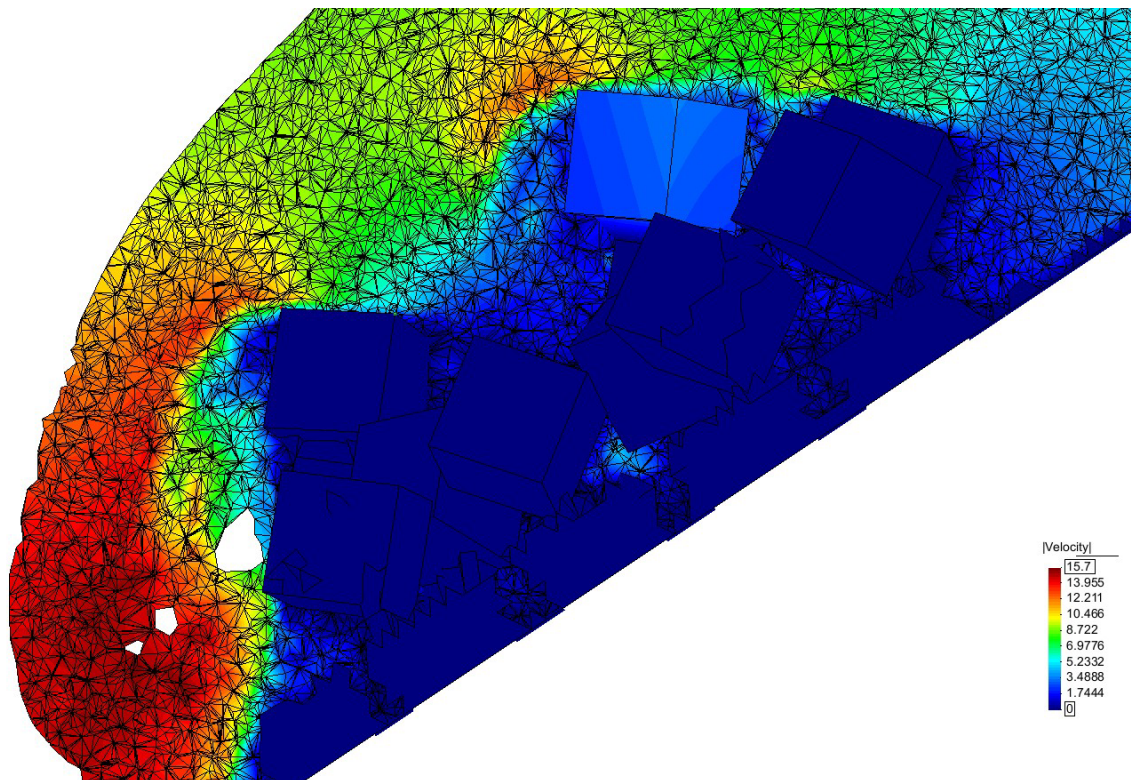


Figura 6.9. Caso inestable ($V_{máx} \approx 12$ m/s)

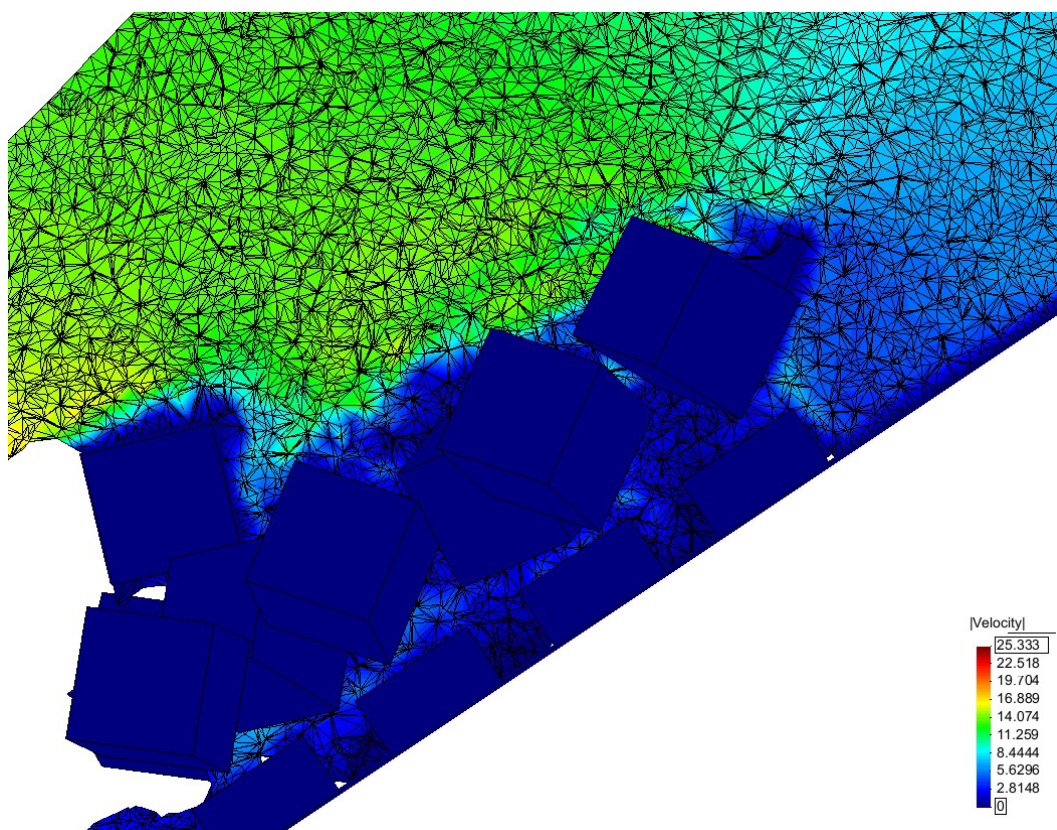


Figura 6.10. Caso estable ($V_{\text{máx}} \approx 13 \text{ m/s}$)

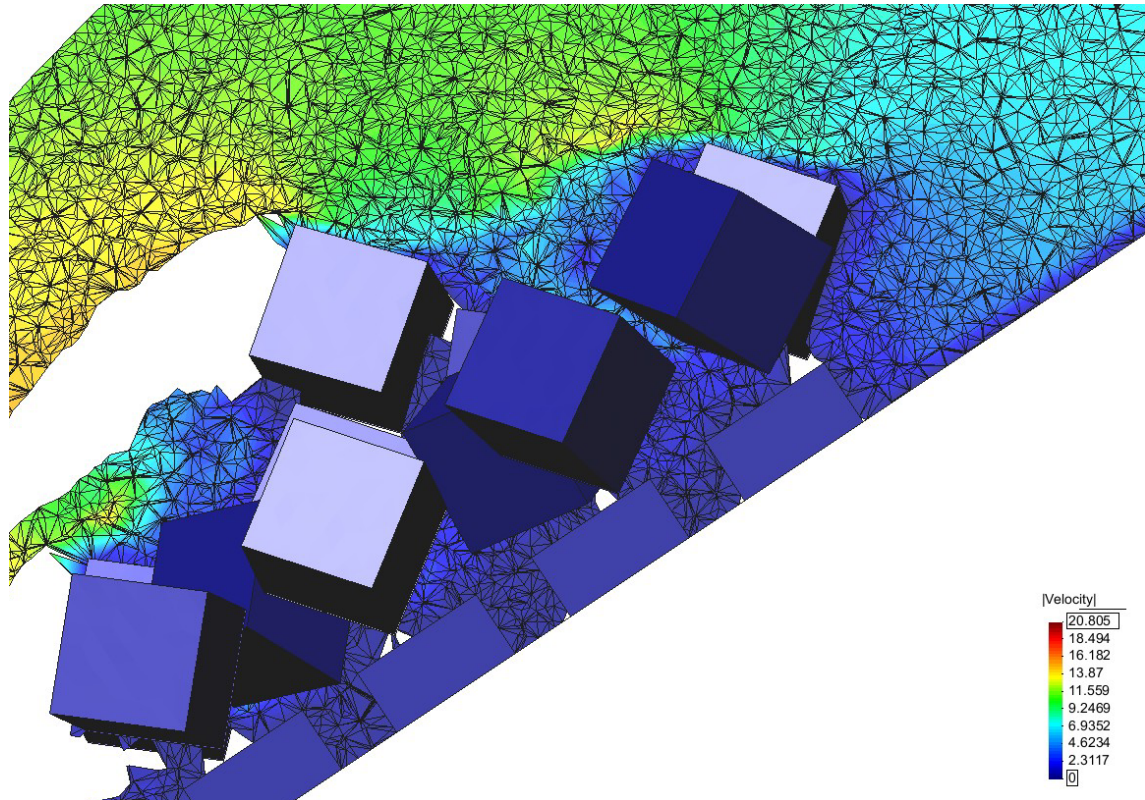


Figura 6.11. Caso estable ($V_{\text{máx}} \approx 13 \text{ m/s}$)

Del análisis de los resultados puede concluirse que la velocidad crítica que provoca la inestabilidad de los bloques de 40 T sobre el talud con pendiente 3H/2V está en torno a los 12 m/s. El hecho de que haya casos estables con velocidades mayores indica que la colocación de los bloques en estos casos era más favorable.

Comparando el valor obtenido con las velocidades que resultan del análisis de los casos iniciales, se pueden extraer conclusiones sobre la estabilidad que se reflejan en la tabla siguiente.

Hs (m)	V máx (m/s)	V crítica(m/s)	Conclusión
6.5	10	12	Estable
7.0	12	12	Inicio inestabilidad
8.0	14	12	Inestable

Tabla 6.3. Conclusiones del análisis

6.2 Resumen y conclusiones

Se ha desarrollado una metodología basada en la técnica PFEM para el estudio de estabilidad de los bloques del manto de un dique emergido. El código permite calcular la presión que ejerce el agua sobre sólidos sumergidos, así como el movimiento de éstos por efecto de esta presión.

Teniendo en cuenta las capacidades del código y de GiD, la herramienta de pre y post proceso utilizada, se ha seleccionado como parámetro fundamental de análisis la velocidad del agua en el entorno de los bloques. El objetivo por tanto es conocer la velocidad crítica de inicio de arrastre para unas determinadas características del dique (geometría y peso de los bloques) y del oleaje (altura de ola, periodo).

La estabilidad de los bloques depende de manera muy importante de su situación sobre el manto, y de la interacción con los bloques adyacentes. No se conoce a priori cuál es la situación más desfavorable de un bloque, si bien es obvio que cuanto más expuesto esté un bloque, más inestable será. A este respecto, se han respetado las prescripciones de colocación que se siguen en la obra, que limitan la distancia desde el extremo más alejado del bloque hasta el talud exterior teórico del dique.

7. USO DEL PFEM PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE UN ESTADO DE MAR ACTUANTE SOBRE UNA MANIOBRA DE FONDEO DE UN CAJÓN

7.1 Introducción y alcance del trabajo

En este apartado se trata de obtener, mediante el modelado y la simulación numérica, respuestas que permitan conocer mejor el comportamiento de un cajón para todo aquello relacionado con la ubicación y las características resistentes de los distintos elementos de fijación y de control de las operaciones y de los movimientos que se producen durante su colocación en la alineación de referencia. Para ello el trabajo se programa en dos fases, una primera que pretende analizar la viabilidad no sólo de la formulación físico-matemática seleccionada sino también del modelo numérico que la implementa buscando la eficacia computacional del modelo numérico tridimensional resultante para representar la interacción del cajón con un medio marino en movimiento (PFEM, interacción fluido-estructura).

En una segunda fase se analiza un cajón real con varios estados de mar y bajo unas determinadas condiciones de operación. En principio se trata de determinar las tensiones que sufren los cables que controlan la operación de colocación del cajón en la alineación definitiva llevándolos incluso hasta rotura. También se pretende determinar los movimientos del cajón de forma que se pueda conocer con precisión la posición óptima para proceder al hundimiento del cajón por inundación. Resulta también interesante conocer los estados últimos de los elementos de fijación del cajón y para ello si fuera necesario, es decir si los estados de mar considerados como referencia dieran respuestas alejadas de esa posición última, se incrementarían las solicitaciones hasta alcanzar algunas posiciones extremas.

Adicionalmente la metodología desarrollada en este trabajo sería susceptible de ser usada para optimizar el diseño de los distintos elementos que intervienen en el proceso, posición y número de cables por ejemplo, e incluso formar parte de un sistema de ayuda a la decisión (SAD Cajones) construido en base a los resultados obtenidos.

7.2 Los modelos físico-matemáticos y las estrategias numéricas

7.2.1 Simulación de los cabrestantes

La simulación de los cabrestantes se ha hecho mediante la inserción en el código PFEM de un cálculo lineal elástico de los cables de sujeción del cajón. Dentro del cálculo acoplado que representa la interacción fluido-estructura, se ha añadido el efecto de las tensiones en los cabrestantes. La inclusión de esta sujeción externa, por lo tanto, influye directamente en el cálculo del movimiento del sólido, pero también de forma indirecta en el movimiento del agua que lo rodea.

Para poder incorporar el efecto de los cabrestantes al problema se ha tenido que incluir en el código las siguientes entidades:

Puntos del cajón a los que llega un cable: cada vez que se calcula el movimiento del cajón y se actualiza su posición, se desplazan igualmente los puntos de sujeción de los cables.

Puntos fijos de los que sale un cable: son puntos que no se mueven. Existe uno por cada punto del cajón que recibe un cable.

Características de cada cable: las características físicas EA, la pretensión inicial y la tensión de rotura.

Procedimiento de cálculo

Se ha asimilado cada uno de los cables a un elemento elástico lineal tal que su tensión toma el valor:

$$T = EA \frac{l' - l_0}{l_0}$$

para cada posición del cajón. Donde l_0 es la longitud del cabrestante cuando éste no tiene tensión.

l_0 se calcula al principio del proceso mediante:

$$l_0 = \frac{l_{ini} EA}{T_{ini} + EA}$$

con l_{ini} siendo la longitud inicial del cabrestante y T_{ini} la pretensión inicial.

Sumando las T de todos los cables al total de fuerzas externas sobre el sólido, se obtiene la dinámica del cajón modificada por la sujeción de los cabrestantes.

Esta solución teórica genera algún problema numérico debido a ganancias de energía que alteran la solución añadiendo movimientos del cajón de alta frecuencia y sin sentido físico. Para eliminar estos problemas, se ha añadido a la implementación una disipación dependiente de la velocidad de deformación del cable de la forma:

$$T_{disip} = \beta \cdot EA \cdot \frac{l' - l'^{\Delta t}}{\Delta t \cdot l'}$$

Al añadir esta disipación a la tensión de los cables, se obtiene una solución estable que no perturba el resultado real (sólo lo perturbaría si hubiera oscilaciones rápidas en el cajón, que no es el caso).

7.2.2 Control del oleaje

Es un efecto conocido en los canales de ensayo que las reflexiones múltiples, si no son tratadas, alteran las condiciones de oleaje deseadas. Por ello en este trabajo se ha

añadido un control dinámico de la pala para minimizar el efecto de las reflexiones, tanto en el cajón como en la propia pala generadora del canal virtual.

La idea principal de este control dinámico del movimiento de la pala generadora del oleaje se basa en instalar diversos sensores de altura de ola (“boyas”) en el dominio de análisis y modificar el movimiento de la pala según la información recibida por los sensores. En especial se han colocado sensores cerca de las zonas de reflexión, pero los hay distribuidos por todo el canal.

Tras un estudio desarrollado con distintos ejemplos en que se ha medido la evolución creciente de las alturas de ola con el tiempo, se decidió disminuir la amplitud de movimiento de la pala, que no el periodo, en cuanto se detectara un cierto nivel de altura de ola. Así pues, asignando a cada sensor distintas alturas con distintos niveles de alerta asignados, estos comunican en qué proporción debe amortiguarse el movimiento de la pala en cada instante de tiempo.

El nivel de alerta de cada sensor está calculado según $H_{m\acute{a}x}$ para 1 hora. En el caso extremo, si se detecta exactamente el valor $H_{m\acute{a}x}$, la pala generadora de detiene completamente, y su movimiento se reanuda más tarde.

7.3 Estudio de viabilidad

7.3.1 Introducción

Los estudios de viabilidad se realizan sobre un cajón y un estado de mar de referencia cuyas principales características geométricas se presentan en la figura siguiente:

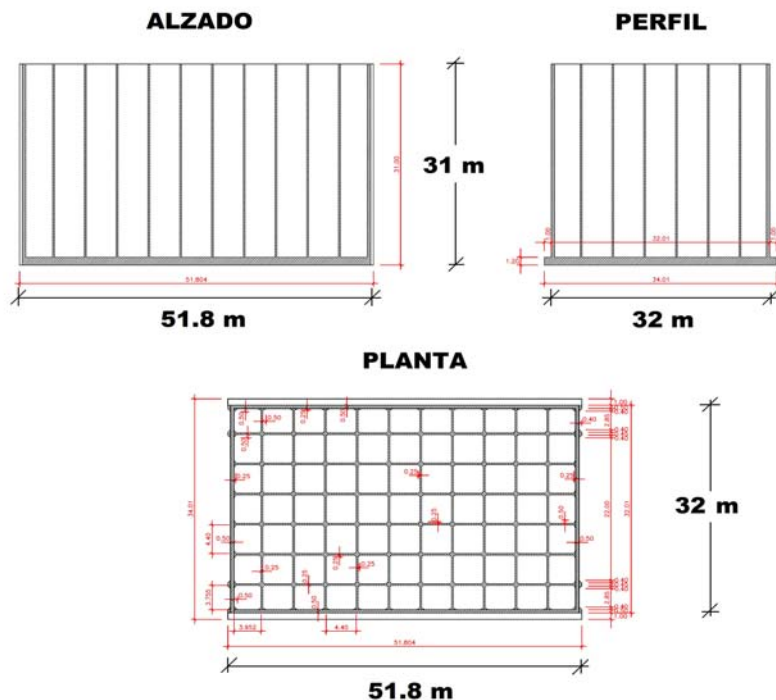


Figura 7.1. Geometría del cajón

Este cajón, de grandes dimensiones, se coloca en la alineación de referencia, muelle o dique vertical, con la ayuda de un sistema de cables distribuidos como muestra la figura. Cada cable tiene un límite elástico y por tanto una tensión de rotura. El estudio de viabilidad se realiza sin contemplar este último efecto aunque para su aplicación práctica se incluye en el análisis.

Variable	Valor
Altura de ola Hs (m)	0,8
Periodo (s)	10

Tabla 7.1.- Características del oleaje

Se utiliza un sistema de 8 cables, la mayoría de ellos de gran longitud, para controlar la colocación del cajón en la posición de referencia, 2 de ellos ubicados entre los cajones fijo y móvil, cables 1 y 2, con sujeciones al cajón o externas a remolcadores o elementos de fuerza equivalentes.

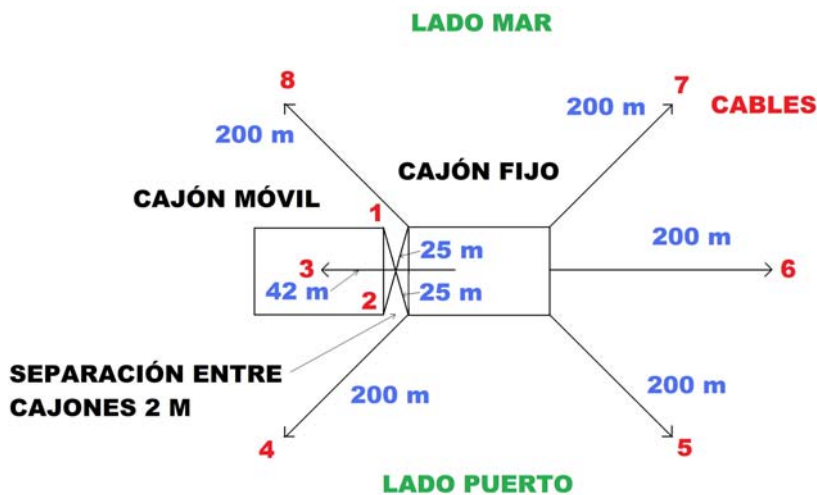


Figura 7.2. Sistema de cables para control de la colocación de los cajones

Cable	Pretensión	Diámetro	Longitud	EA	Límite de rotura
núm.	(kN)	(mm)	(m)	(kN)	teórico (kN)
1	15	18	25	15,657	204
2	15	18	25	15,657	204
3	50	36	42	62,630	815
4	50	36	200	62,630	815
5	50	36	200	62,630	815
6	50	36	200	62,630	815
7	50	36	200	62,630	815
8	50	36	200	62,630	815

Tabla 7.2. Características geométricas y resistentes de los cables

7.3.2 *El modelado numérico*

Es necesario en primer lugar modelar numéricamente el dominio de análisis, es decir los cajones, los cables o su efecto y el medio marino que los rodea. En principio este dominio debería ser amplio de forma que no condicione o limite en medida alguna el comportamiento efectivo del fenómeno físico a estudiar. No obstante en cualquier modelado numérico de problemas complejos es necesario encontrar una solución de compromiso para compatibilizar el dominio espacial de cálculo con el comportamiento físico-matemático de referencia y el método numérico que se usa para encontrar la respuesta deseada.

En este contexto el modelo numérico que nos ocupa tiene tres puntos clave o críticos: la pala que genera un estado de mar concreto, el espacio necesario para que se desarrolle el estado de mar deseado y el cajón, con sus cables, cuyo movimiento y efectos queremos determinar. El modelo debe tener en cuenta una distancia mínima entre el cajón y la pala generadora, por lo menos dos veces el calado para permitir que se desarrolle el oleaje, y una distancia suficiente para disiparlo una vez que la ola haya actuado sobre el cajón. También deberá existir espacio suficiente en los laterales del cajón móvil y todas aquellas otras cuestiones necesarias para representar adecuadamente la realidad, irregularidades del fondo, etc. (Figura 7.3).

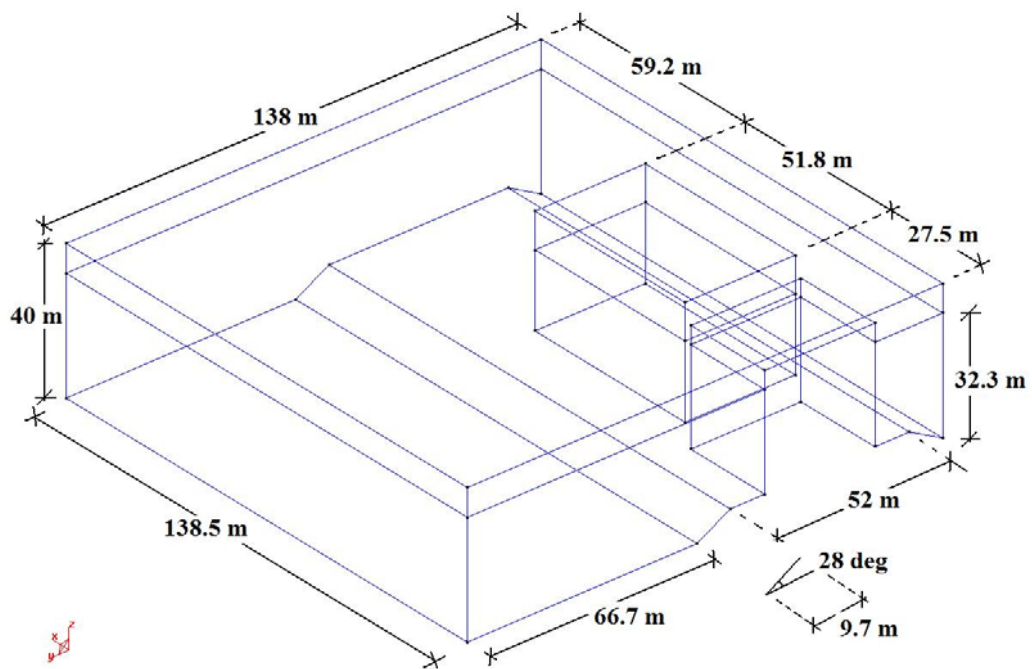


Figura 7.3. Dominio geométrico de referencia considerado

Existen en el dominio de análisis varias zonas claramente diferenciadas que requieren un nivel de aproximación (refinado de la malla) diferente, creciente desde la pala generadora a los entornos más próximos del cajón. Resulta sencillo comprobar que si se considera una representación espacial uniforme con tamaños diferentes por zonas, aparecen en las interfaces alteraciones en el comportamiento físico más básico (por ejemplo respuestas con saltos en la distribución de velocidades del agua en las fronteras de las zonas) incluso cuando los modelos usados son grandes, un tamaño único muy pequeño resolvería este problema pero no sería compatible con un tiempo de cálculo operativo.

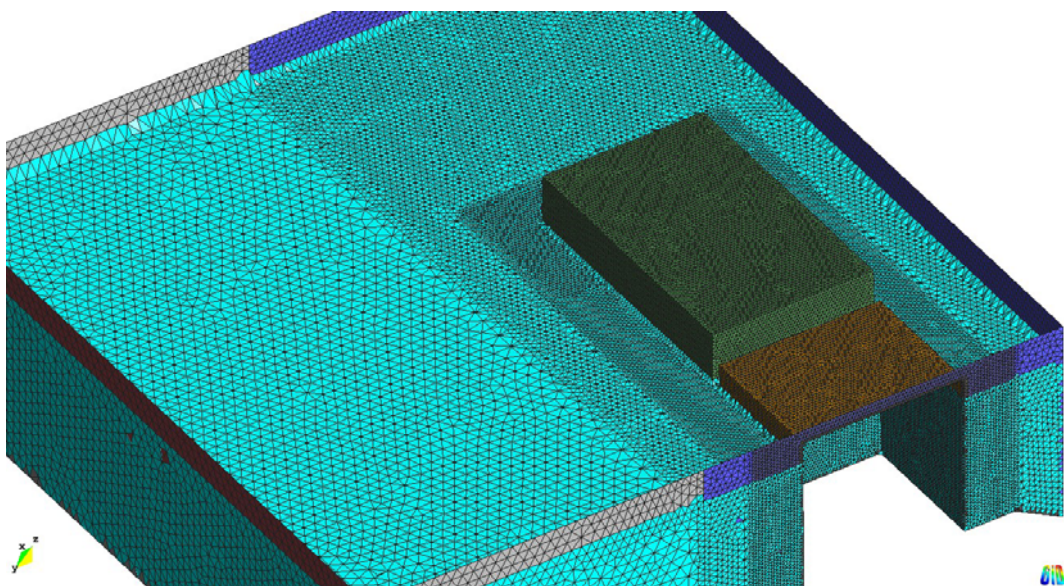


Figura 7.4. Modelo numérico obtenido con una estrategia de modelización convencional

En la Figura 7.4 se muestra un modelo numérico con mallas de elementos finitos uniformes variando su tamaño en tres zonas distintas:

Zona de generación del oleaje, tamaño de elementos 2,2 m.

Zona de acercamiento y disipación, tamaño de elementos 1,2 m.

Zona del cajón, tamaño de elementos 0,7 m.

El modelo numérico final resultante tiene más de 4 millones de elementos tridimensionales, cantidad apreciable que precisa, para obtener una solución competitiva, de unos recursos y un tiempo de computación importantes.

El estudio de viabilidad para la metodología de cálculo adoptada pasa por encontrar formulas de modelado físico-geométrico que permitan superar estas cuestiones. Para ello se ha trabajado en el proyecto sobre dos estrategias diferentes pero que se complementan. Una primera que busca una transición suave lineal en el tamaño de los elementos que se usan para representar las diferentes zonas. Y otra denominada de cajas concéntricas que definen las zonas y encierran un tamaño de elementos determinado.

Estas estrategias se han implementado en un código denominado PFLOW, diseñado específicamente para el proyecto, necesario para manejar con la precisión requerida el gran tamaño del dominio considerado.

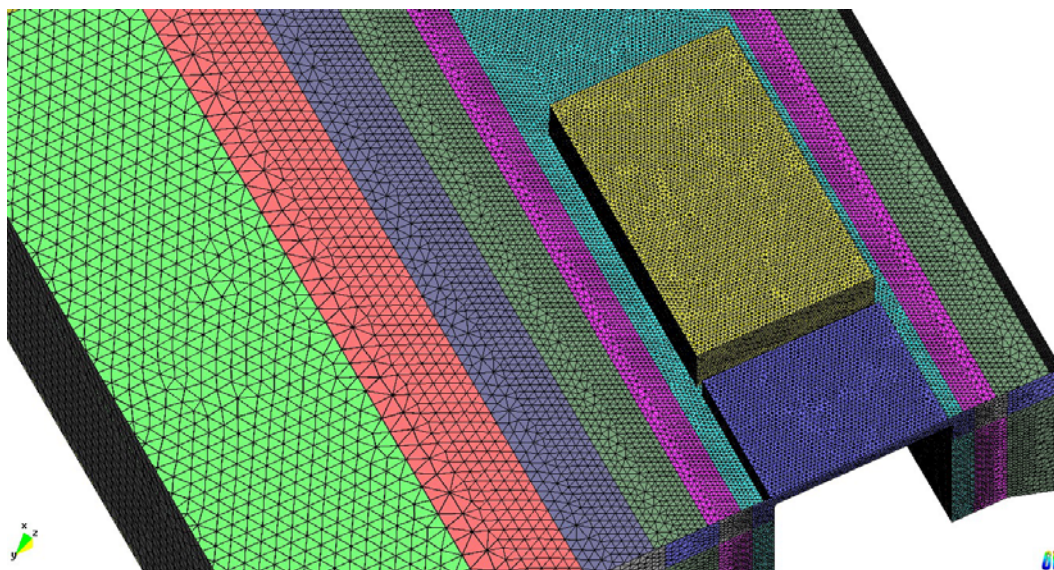


Figura 7.5. Modelo numérico obtenido con una estrategia de modelización basada en un tamaño progresivo

En la Figura 7.5 se muestra un modelo numérico con mallas de elementos finitos que cambian progresivamente de tamaño:

Desde 2,8 m en las proximidades de la pala hasta 0,7 m. en los alrededores del cajón.

Desde 0,7 m. en los alrededores del cajón hasta 1,4 m en la pared posterior disipativa.

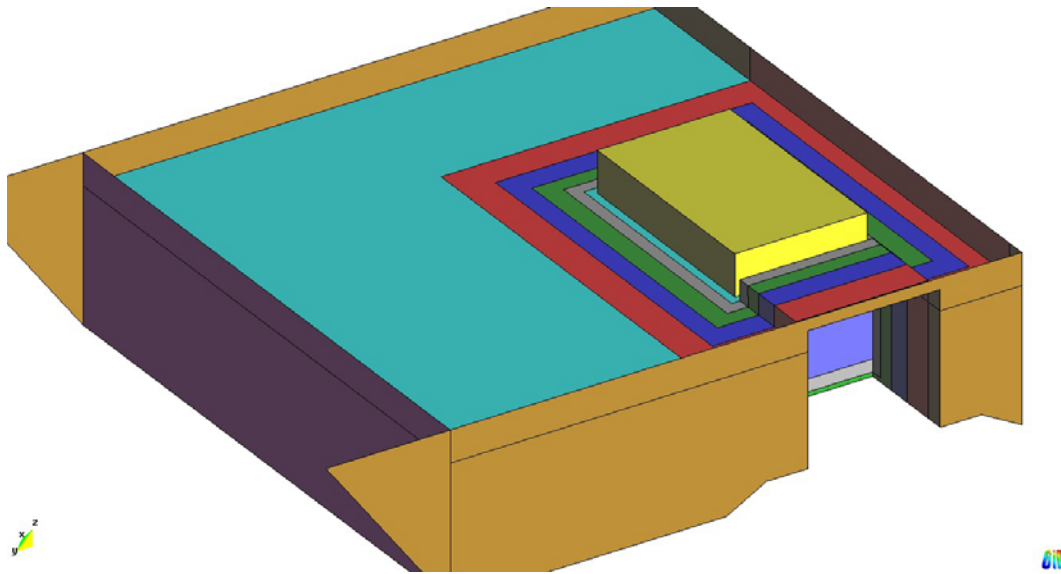


Figura 7.6. Estrategia de modelización mediante cajas concéntricas

Con esta sencilla técnica se reduce considerablemente el tamaño del modelo de elementos finitos resultante, en más de un 25% (modelo final con un número de elementos tridimensionales del orden de 3 millones) sin que ello reduzca la calidad de los resultados obtenidos.

Los tamaños de los elementos van progresando de forma paralelepídicamente concéntrica consiguiendo los mayores tamaños a medida que nos alejamos, en todas las direcciones, del punto más crítico. En la figura 7.6 puede apreciarse como se concentran los paralelepípedos alrededor del cajón móvil para con ello representar con la mayor precisión posible las acciones del oleaje sobre el cajón y así mejorar la calidad de la respuesta que se obtiene en el análisis de su movimiento y sus consecuencias.

En la figura 7.7 se muestra un modelo numérico con tamaños de malla obtenidos con zonas paralelepídicamente concéntricas con las siguientes características:

Seis zonas concéntricas con el centro de gravedad del cajón móvil como referencia. Factores de concentración por zona que varían entre 0.7, 1, 1.4, 2, 2.8 y 4 desde el cajón hacia la pala generadora.

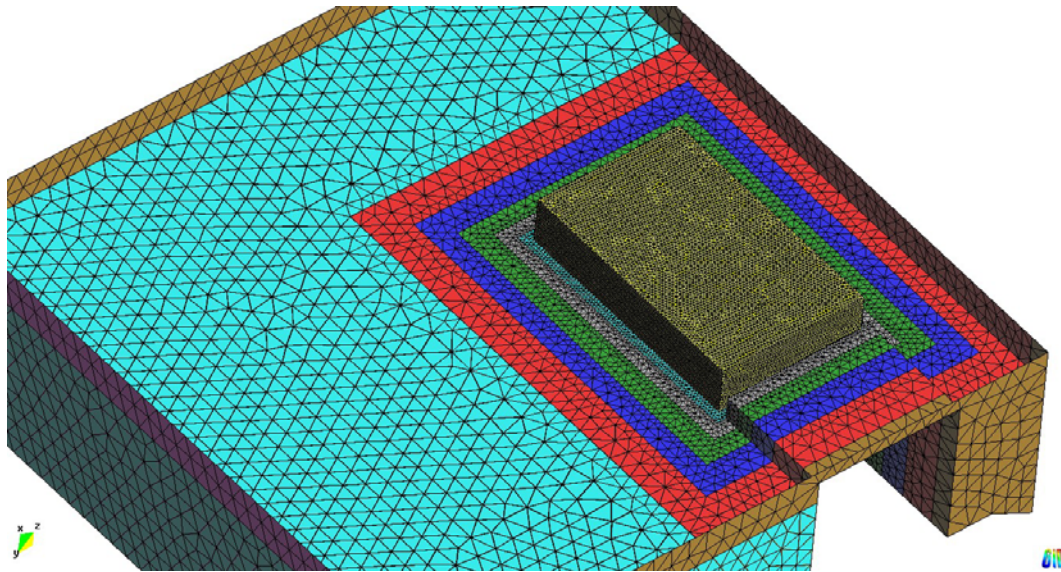


Figura 7.7. Modelo numérico obtenido mediante la técnica de cajas concéntricas

Con esta técnica, un poco más compleja pero fácil implementación, se reduce todavía más el tamaño del modelo de elementos finitos final resultante, un 75% en relación con la técnica convencional y un 66% con respecto a la estrategia de un tamaño progresivo. Resulta un modelo numérico final con un número de elementos tridimensionales del orden de 1 millón, sin que ello reduzca la calidad de los resultados obtenidos

En problemas complejos como el que nos ocupa la representación mediante elementos finitos del dominio de referencia tiene una gran importancia pues es necesario optimizar, en el sentido de reducir lo máximo posible, el tamaño del problema en aras a reducir los recursos y tiempos de cálculo asociados. Pero además si las representaciones eliminan posibles singularidades incorporando transiciones suaves, se pueden evitar inconvenientes numéricos que repercuten en la calidad de la solución (por ejemplo proporcionando variaciones de las velocidades del agua mucho más suaves en el dominio considerado).

7.4 Resultados más significativos obtenidos en los análisis realizados durante el proceso de validación

Los análisis realizados permiten conocer el estado del mar que actúa realmente sobre el cajón así como la tensión que las olas provocan en los cables que controlan la operación de colocación de los cajones en las alineaciones de referencia y los movimientos en el centro de gravedad y en las esquinas del mismo.

El estado de mar se caracteriza numéricamente mediante control de la altura de ola calculada en unos puntos definidos específicamente para este fin (sensores de altura). En las Figuras 7.8, 7.9 y 7.10 se muestra la altura de ola en posiciones próximas a la pala, cajón e intermedia y se puede observar que la respuesta presenta algunas oscilaciones de alta frecuencia debido a que en ciertos momentos del análisis los puntos de referencia sufren

unos movimientos bruscos, importantes localmente para el punto, pero poco relevantes globalmente para el estado de mar.

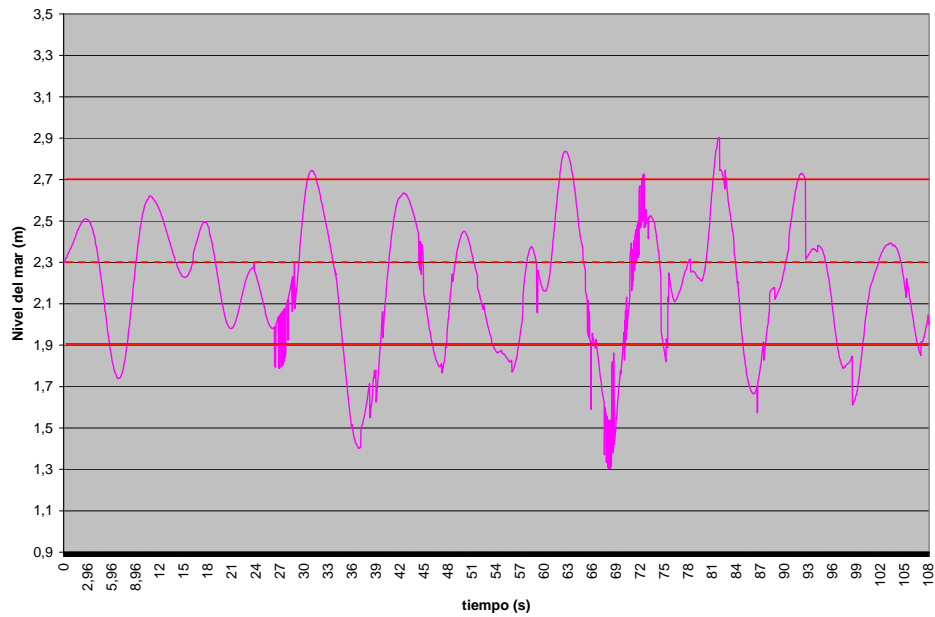


Figura 7.8. Nivel del mar junto a la pala generadora

En todos los casos la recta roja discontinua marca el nivel medio del mar, situado a 2.3 m. Las rectas continuas limitan la región teórica en la que estaría contenido el oleaje de diseño, igual a 0.8 m, es decir, 0.4 metros por encima y por debajo del calado medio. En la Figura 7.11 se muestra la altura de ola en todas las secciones de control consideradas.

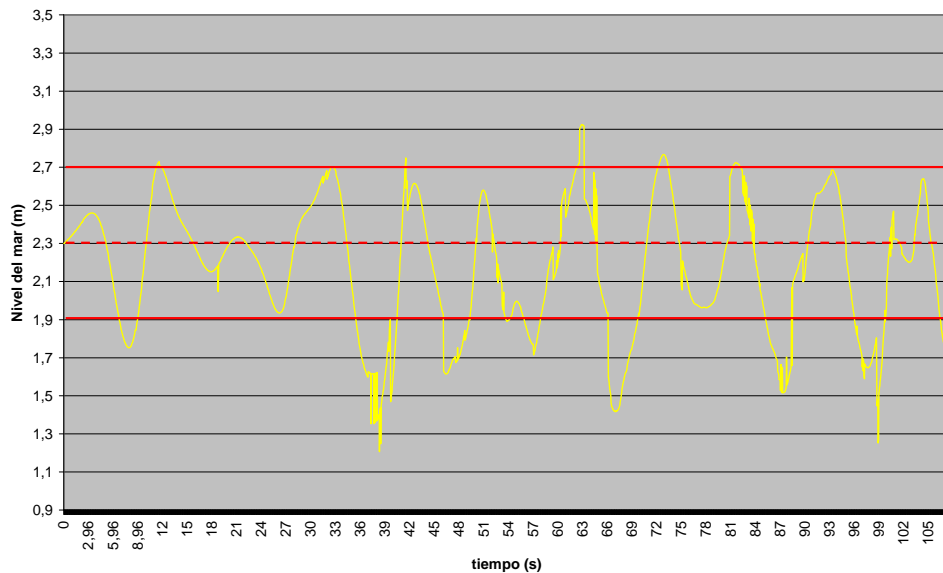


Figura 7.9. Nivel del mar en un punto intermedio cajón-pala

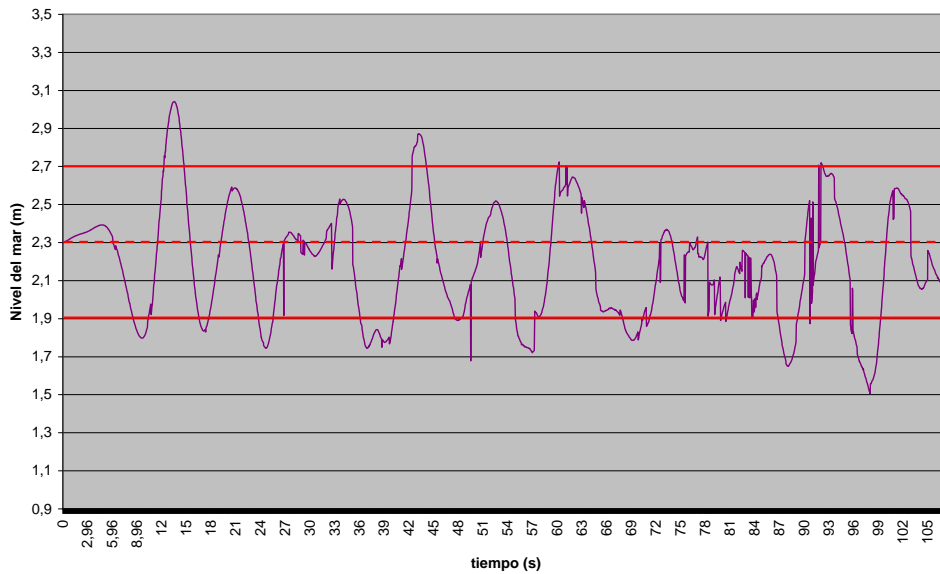


Figura 7.10. Nivel del mar en las proximidades del cajón

También es necesario destacar que el estado de mar calculado evoluciona de forma irregular a partir de unos datos iniciales de referencia, altura y período, que se usan fundamentalmente en la simulación numérica para caracterizar un movimiento variable de la pala generadora de olas simulando un amortiguamiento ficticio. Este estado de mar es un resultado que se obtiene también en la simulación realizada en este trabajo y podrá ser distinto, aunque no muy diferente, a cualquier otro alternativo, virtual o de laboratorio, determinado a partir de los mismos datos iniciales.

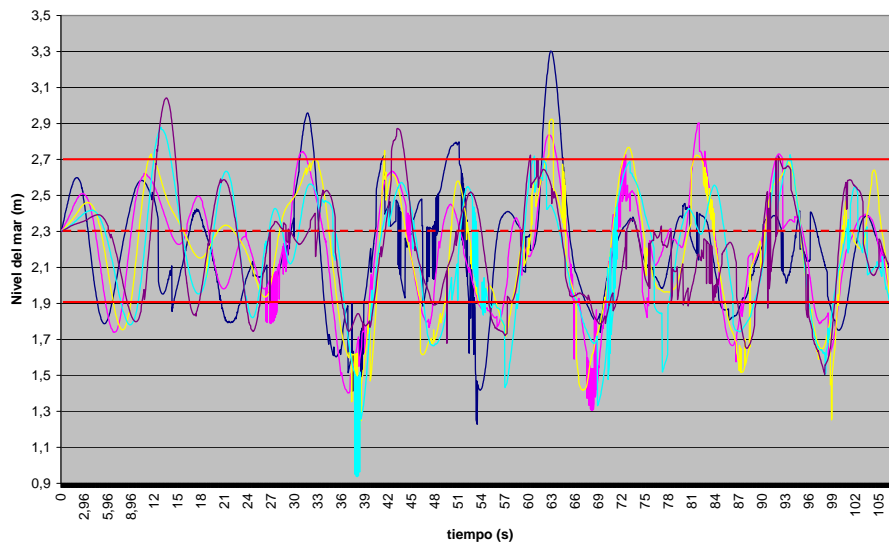


Figura 7.11. Visión general del nivel del mar en las distintas secciones de control

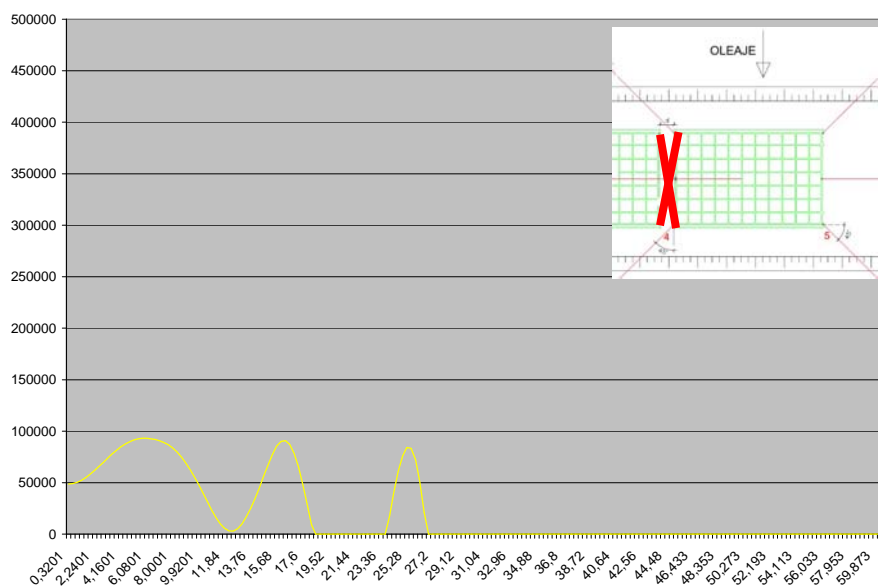


Figura 7.12. Evolución de las tensiones en el cable 1-2

Los cables 1 y 2 que actúan uniendo las esquinas laterales del cajón fijo con el cajón móvil alcanzan la tensión límite rápidamente no sólo porque están muy solicitados por el movimiento del cajón inicialmente sino y especialmente porque su tensión última es muy pequeña, 204 kN. Este efecto también se pone de manifiesto en los ensayos realizados y aunque el cable 2 no alcanza el límite de rotura se queda próximo a él. Este efecto se confirma con algunas otras experiencias en obra con resultados cualitativamente comparables.

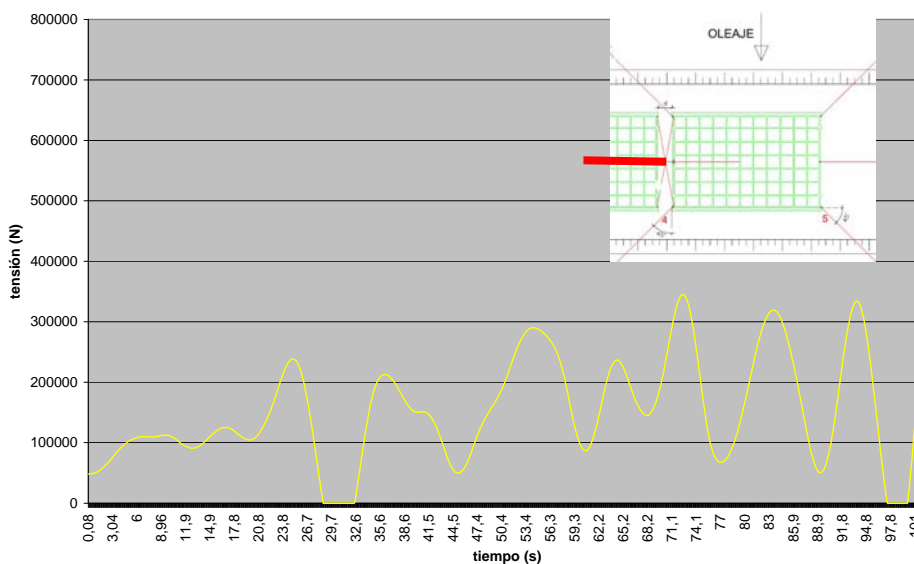


Figura 7.13.- Evolución de las tensiones en el cable 3

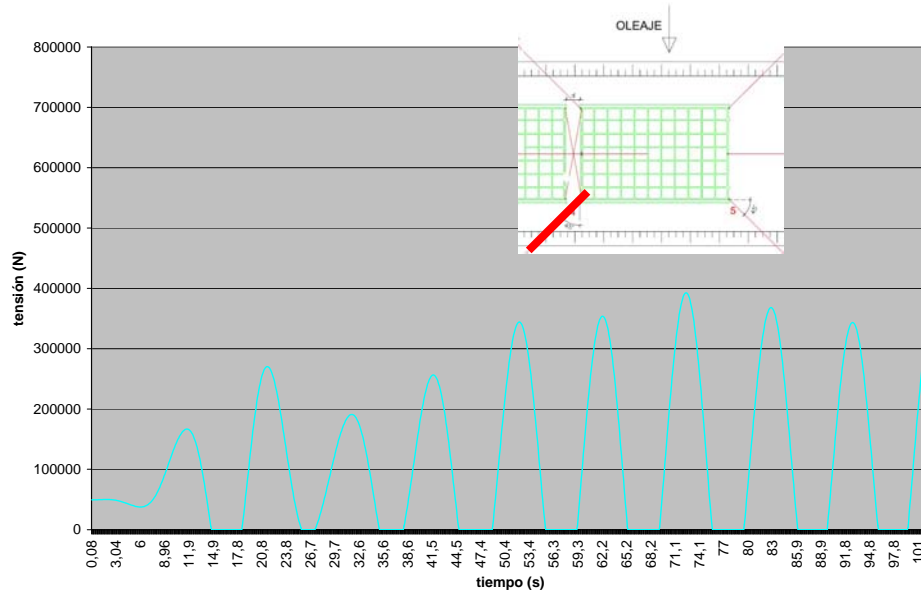


Figura 7.14.- Evolución de las tensiones en el cable 4

El valor máximo de la tensión en el cable 3, en el tiempo de análisis considerado, es aproximadamente de 365 kN, valor que está bastante alejado del obtenido experimentalmente 516 kN que por otro lado no encaja con la serie de valores que el laboratorio proporciona (77, 104, 150, 516, 189). En cualquier caso el cable 3 termina sin tensión después de trabajar un corto tiempo.

Se debe resaltar que las irregularidades de alta frecuencia del nivel de mar en los alrededores del cajón no afectan a la tensión del cable, evolución de la tensión continua y monótona, lo que pone de manifiesto el carácter local de las mismas. Esto también ocurre para los otros cables como puede verse a continuación.

El valor máximo de la tensión en el cable 4 en el tiempo de análisis es aproximadamente de 388 kN. Este valor coincide con la suficiente aproximación con el medido en los experimentos realizados en laboratorio trasladados convenientemente a la escala real, que proporciona un valor estimado 328 kN. En cualquier caso valor suficientemente alejado de la tensión de rotura de 815 kN.

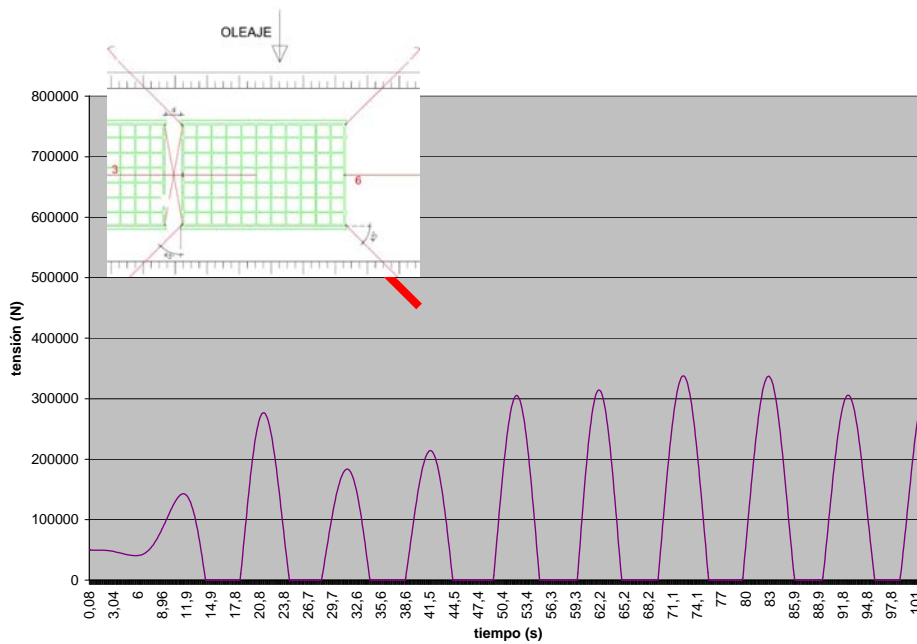


Figura 7.15.- Evolución de las tensiones en el cable 5

El valor máximo de la tensión en el cable 5 en el tiempo de análisis es aproximadamente de 331 kN. Este valor coincide con la suficiente aproximación con el medido en los experimentos realizados en laboratorio trasladados convenientemente a la escala real, que proporciona un valor estimado de 368 kN. En cualquier caso valor suficientemente alejado de la tensión de rotura de 815 kN.

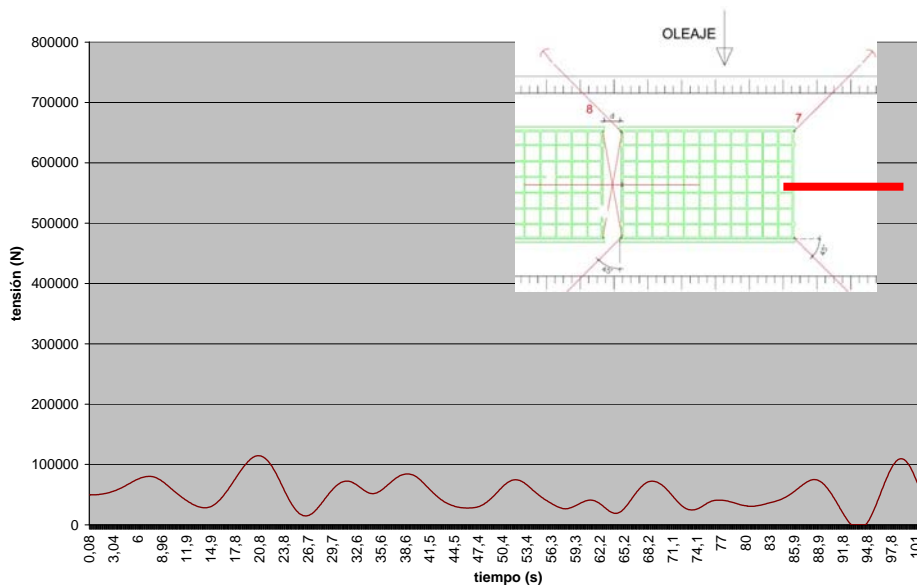


Figura 7.16. Evolución de las tensiones en el cable 6

El valor máximo de la tensión en el cable 6 en el tiempo de análisis es aproximadamente de 115 kN. Este valor está alejado del medido en los experimentos realizados en laboratorio trasladados convenientemente a la escala real, que proporciona un valor estimado de 302 kN .

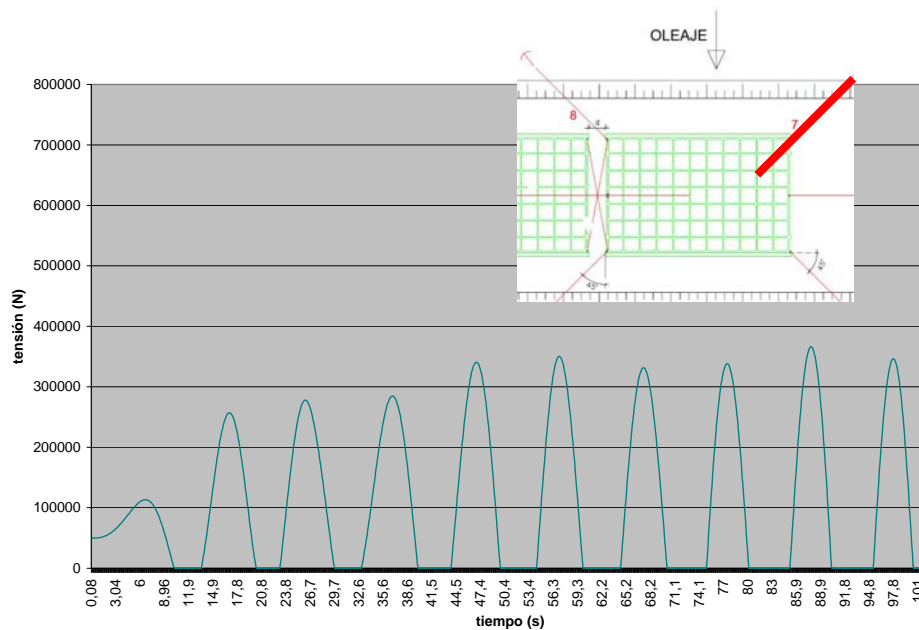


Figura 7.17. Evolución de las tensiones en el cable 7

El valor máximo de la tensión en el cable 7 en el tiempo de análisis es aproximadamente de 346 kN. Este valor coincide con la suficiente aproximación con el medido en los experimentos realizados en laboratorio trasladados convenientemente a la escala real, que proporciona un valor estimado de 433 kN. En cualquier caso valor suficientemente alejado de la tensión de rotura de 815 kN.

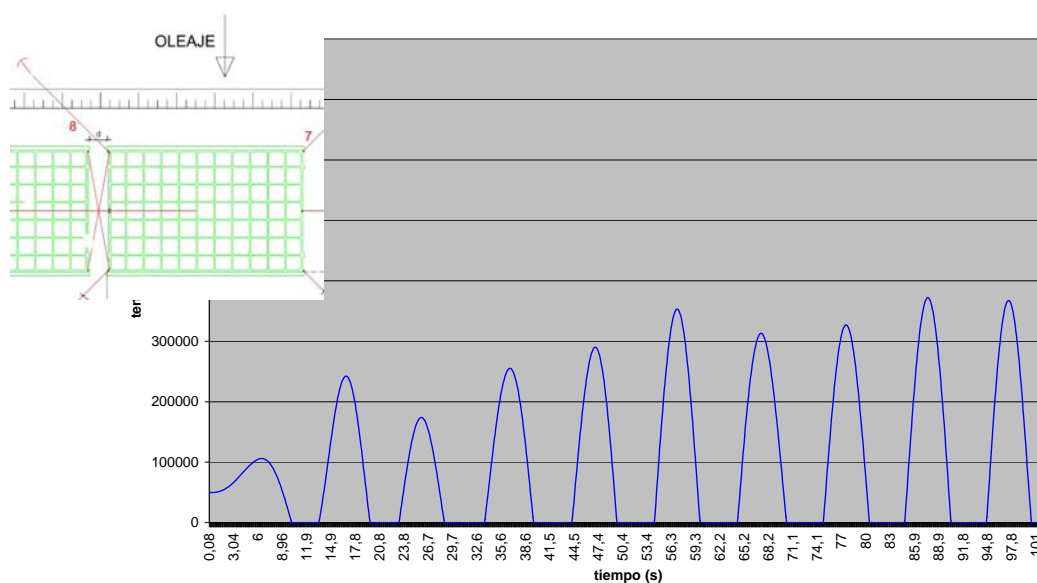


Figura 7.18. Evolución de las tensiones en el cable 8

El valor máximo de la tensión en el cable 8 en el tiempo de análisis es aproximadamente de 362 kN. Este valor coincide con la suficiente aproximación con el medido en los experimentos realizados en laboratorio trasladados convenientemente a la escala real, que proporciona un valor estimado de 391 kN. En cualquier caso valor suficientemente alejado de la tensión de rotura de 815 kN.

En la Figura 7.19 se muestra una visión conjunta la evolución de la tensión en todos los cables en la que se aprecia como se estabiliza la tensión en los cables. En la Tabla 7.3 se resumen los valores de las tensiones, calculadas y experimentales, en los distintos cables del sistema de fijación considerado.

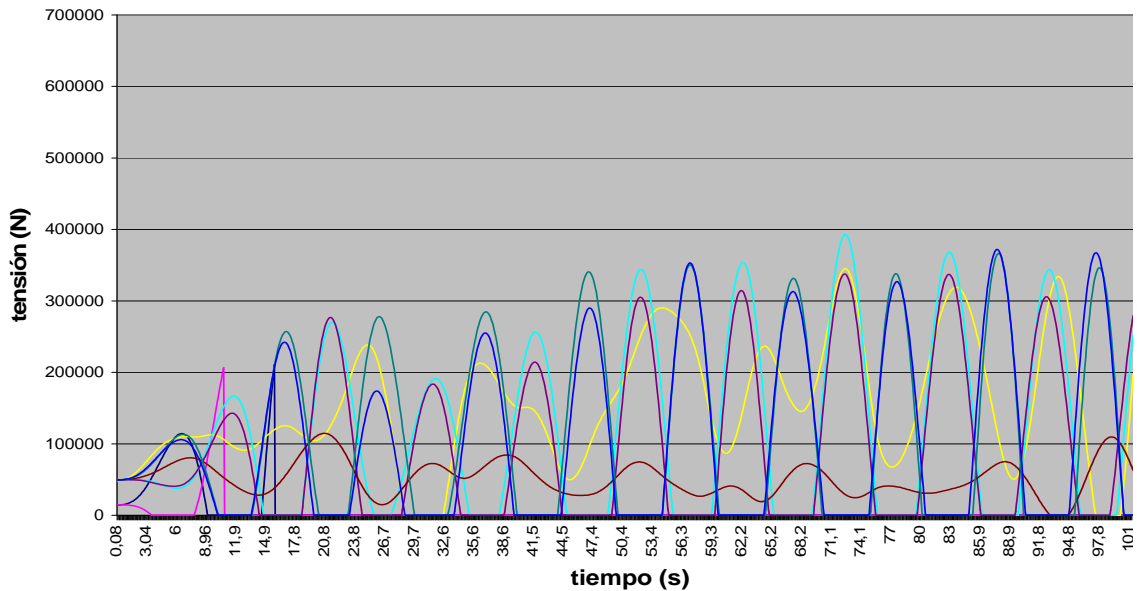


Figura 7.19. Resumen de la evolución de las tensiones en todos los cables

Tensión Cable	3	4	5	6	7	8
Laboratorio	516	328	368	303	433	391
Numérica	365	388	331	115	346	362

Tabla 7.3. Resumen de las tensiones máximas en los cables

7.5 Conclusiones del estudio realizado para la validación

Del estudio realizado se pueden obtener las siguientes conclusiones:

No se observan resultados anómalos ni espurios que alteren las velocidades o provoquen saltos en las fuerzas que actúan sobre el cajón, como consecuencia del dominio geométrico y del modelo numérico, utilizados.

El estado de mar se genera con un movimiento variable de una pala, obtenido mediante el control de la altura de ola en unos puntos de referencia, que amortigua y mantiene las principales características del oleaje requerido.

No parecen necesarias, salvo para el cable número 6 horizontal en el lateral más alejado del cajón fijo, simulaciones temporalmente largas lo que le da una mayor viabilidad y efectividad en la práctica al método propuesto.

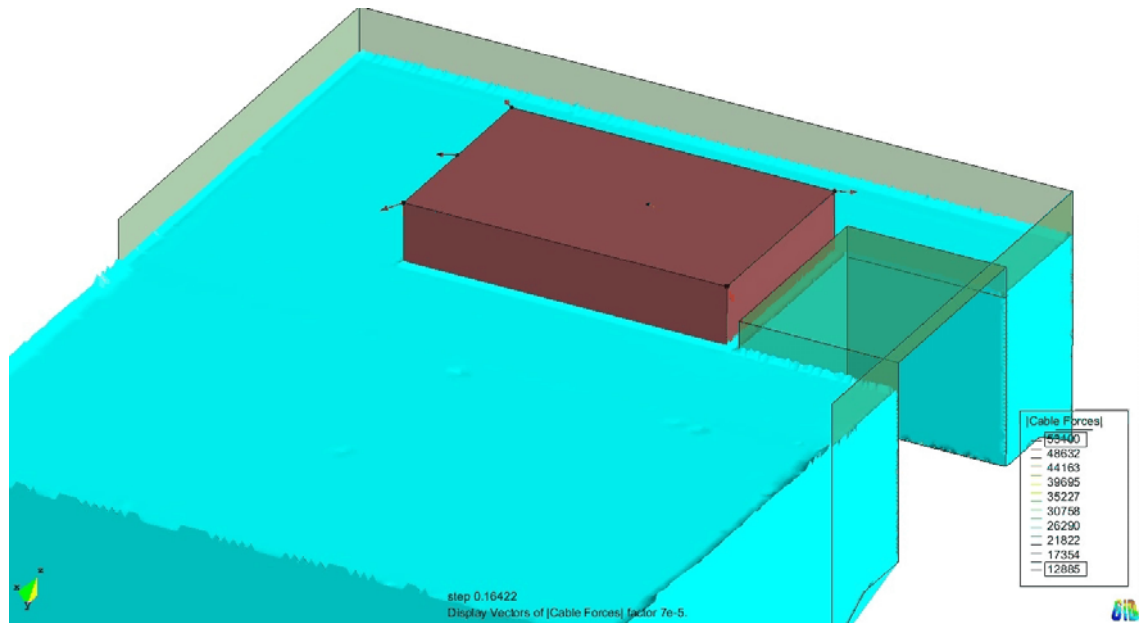


Figura 7.20. Vista general de la simulación realizada

Existen algunos desajustes en los valores obtenidos para las tensiones de los cables, en algún caso claramente imputables a los resultados de la experimentación, y en otros difíciles de valorar. Será necesario profundizar en los resultados experimentales para eliminar algunas incertidumbres.

Algunos cables, 1 y 2, tienen tensiones que se encuentran cercanas a los límites últimos pero no es relevante desde el punto de vista de este apartado que se superen o no. En cualquier caso el resto de cables se encuentran suficientemente alejados de sus posiciones límites.

Durante la operación de colocación, el cajón móvil se acerca al fijo pero de forma tal que los cables que controlan su movimiento (números 4, 5, 6, 7 y 8) soportan tensiones del mismo orden de magnitud (valores entre 300-400 kN).

7.6 Aplicación de la metodología al diseño del proceso de fondeo

Como aplicación de la metodología desarrollada, se estudia a continuación el comportamiento de un cajón real durante el fondeo considerando distintas configuraciones para los cables de sujeción. Para poner a punto todo el proceso numérico se estudia en primer lugar el cajón con una sujeción de referencia, similar a la usada durante la modelación anterior de validación. Posteriormente una vez resueltas las singularidades numéricas que introduce en el cálculo la nueva geometría, se realizan los análisis más definitivos con cables de sujeción dispuestos de manera alternativa.

Hay que destacar que los primeros estudios que se hacen y presentan aquí no pretenden validar el método, ya validado en el apartado anterior, sino poner de manifiesto los comportamientos diferentes que la nueva geometría del cajón ocasiona, giros o movimientos más intensos o con orientaciones más desfavorables, haciendo trabajar los

cables de sujeción de forma diferente a la obtenida durante la validación. Esto hace que en una primera fase no se pretenda alcanzar la precisión de la respuesta sino más bien detectar las principales variables para diseñar de la forma más adecuada el modelo numérico de cálculo definitivo.

El nuevo cajón que se analiza es más pequeño, no sólo en la eslora y manga sino también en la altura del fuste, que el anterior de validación. En la generación del modelo numérico se consideran las técnicas de cajas concéntricas propuestas durante el proceso de validación.

En la Figura 7.22 se muestra el sistema de sujeción del cajón flotante considerado que no es una extensión del usado en la fase de validación, simétrico actuando en esquinas y centro de las paredes laterales. Con ello se pretende poner de manifiesto la influencia de la geometría del cajón en la respuesta de forma que en una primera fase no se superpongan efectos que pueden actuar en direcciones opuestas.

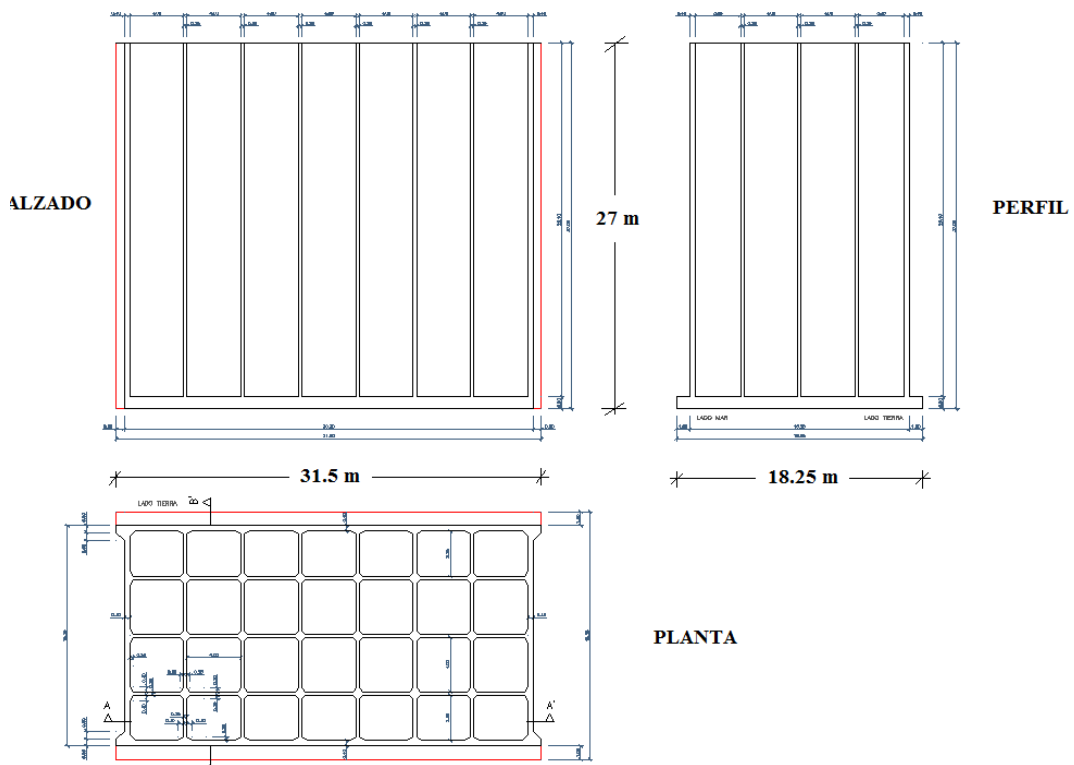


Figura 7.21. Geometría del cajón analizado en la aplicación propuesta

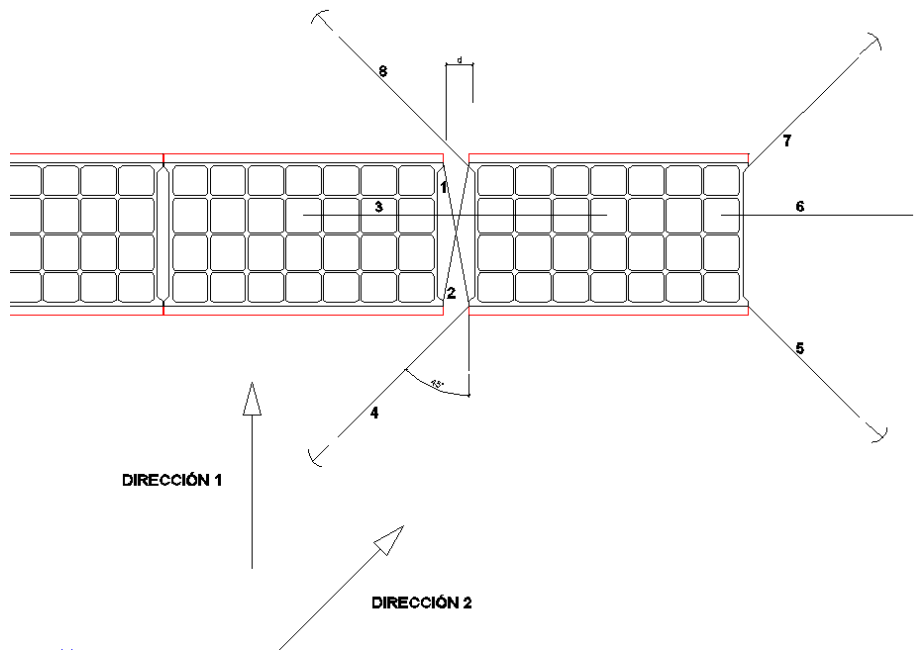


Figura 7.22. Sistema de cables de control y dirección del oleaje

Se consideran las mismas condiciones de mar, que se muestran en la Figura 7.23 en la que se señala la evolución del nivel de mar junto a la pala generadora del movimiento, en el intervalo de tiempo considerado. Puede apreciarse que el nivel de mar considerado en el análisis supera los límites de diseño representados por las líneas de color rojo en la figura lo que indica un cierto carácter irregular del sistema que se crea.

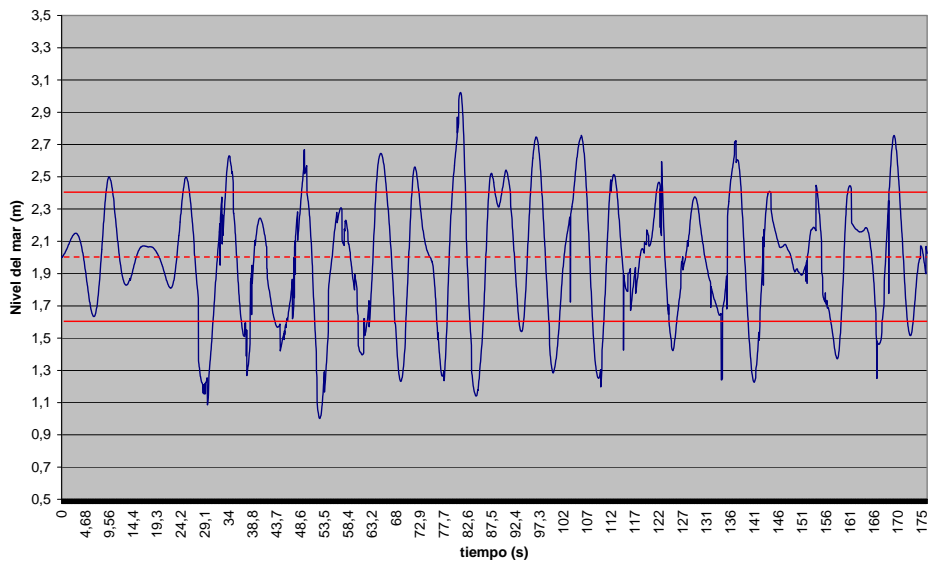


Figura 7.23. Nivel del mar en las proximidades de la pala

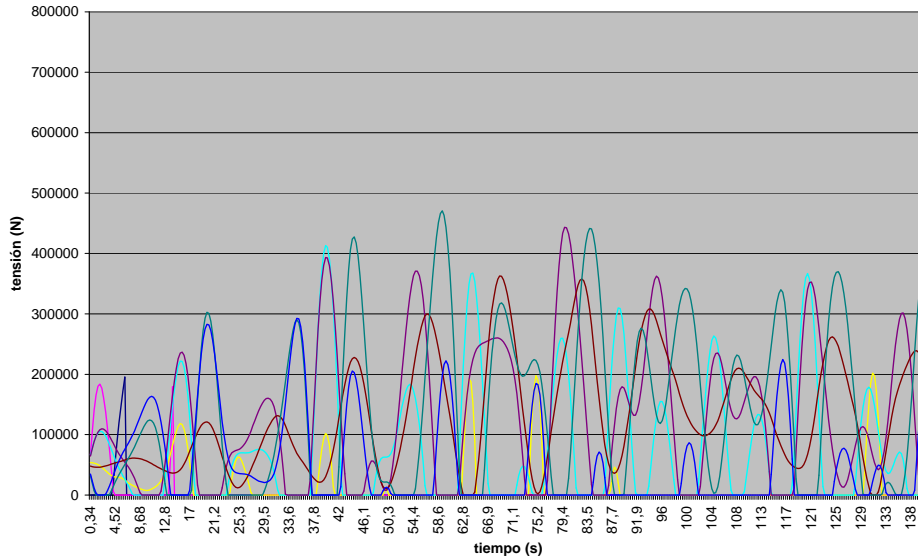


Figura 7.24. Evolución de la tensión en el conjunto de cables considerados

En estas condiciones y considerando unos cables con las mismas propiedades resistentes que las mostradas en la Tabla 7.2, se obtienen para las tensiones los resultados mostrados en la Figura 7.4. En ella puede observarse que la evolución de las tensiones máximas en los cables está en sintonía con el período de la ola de diseño de forma que la variación en el tiempo no produce más efecto que el de secuenciar el protagonismo en el movimiento de los diferentes cables considerados.

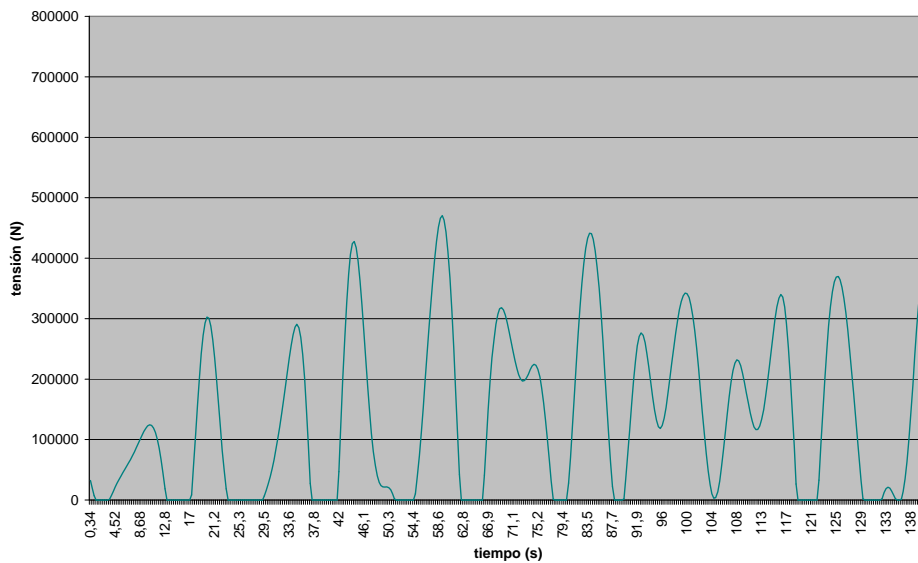


Figura 7.25. Evolución de la tensión en el cable número 7

El cable más solicitado es el número 7, ubicado en la esquina lateral interior derecha, lo que pone de manifiesto un movimiento del cajón en las esquinas de sujeción mayor que en el caso de referencia usado durante la validación, que en la práctica lo acerca al cajón fijo más próximo de la alineación considerada.

Todo ello indica que la nueva configuración geométrica introduce en la respuesta algunos cambios que hacen que las situaciones operativas sean relativamente menos seguras que la de referencia, lo que no quiere decir que lo sean en valor absoluto.

Los estudios realizados en esta fase tratan también con algunos aspectos de cierta relevancia a la hora de aplicar en la práctica el método propuesto en este trabajo. En particular para encontrar situaciones de mar límites o últimas, es decir que provoquen roturas en los cables, y para representar las respuestas de forma ingenieril, es decir de forma útil para la toma de decisiones.

OLEAJE		Cable 1 (kN)	Cable 2 (kN)	Cable 3 (kN)	Cable 4 (kN)	Cable 5 (kN)	Cable 6 (kN)	Cable 7 (kN)	Cable 8 (kN)
Pretensión		15	15	50	50	50	50	50	50
Tensión rotura		204	204	815	815	815	815	815	815
H (m)	1,7	Roto	Roto	96	281	285	146	414	302
H (m)	2,1	Roto	Roto	0	317	493	181	374	191
H (m)	4,2	Roto	Roto	0	236	Roto	721	649	83

Tabla 7.4. Tensiones máximas en los cables para distintas condiciones de mar

Para ello se realizan diversos análisis con distintas condiciones de mar, caracterizadas por la altura y el período de pico de la ola de diseño que incide sobre el cajón. En la Tabla 7.4 se muestra los resultados obtenidos para el cajón analizado en este apartado.

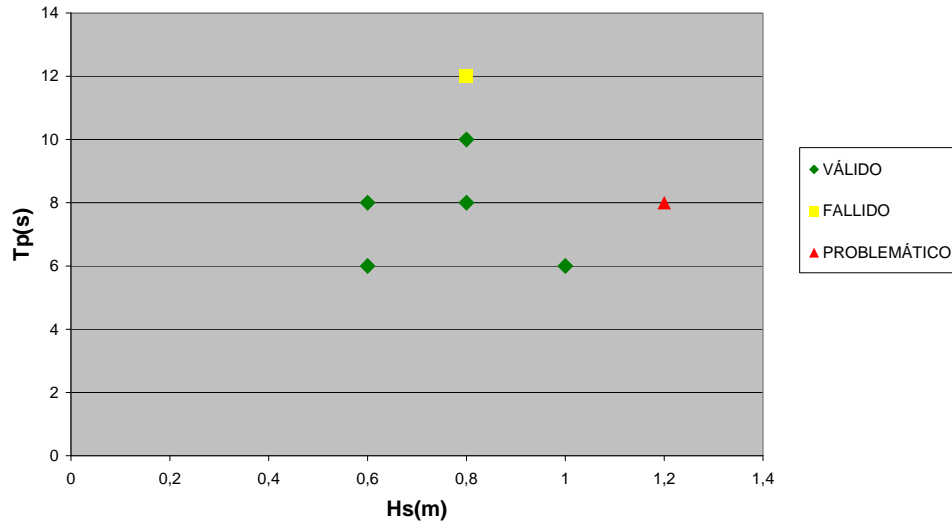


Figura 7.26. Tabla de Obra que valora las condiciones de fondeo en función del estado de mar

Los resultados obtenidos para los distintos estados de mar también se pueden agrupar bajo calificaciones o epígrafes de riesgo, asignándolos a grupos que se denominan: válidos, fallidos y problemáticos. El grupo válido se caracteriza porque la tensión en ningún cable supera el 55% de la tensión última. Si esto no ocurriera el evento considerado se incluye en el grupo denominado problemático. Cuando en algún cable se supera la tensión última el grupo pasa a denominarse fallido. Todos estos asuntos se incorporan al gráfico de la Figura 7.26 que se denomina Condiciones de Fondeo dónde con colores verde, amarillo y rojo se visualizan los diferentes casos analizados.

7.7 Diseño de nuevas operaciones de fondeo

Se presentan a continuación algunas de las facilidades que proporciona la metodología desarrollada en este trabajo en relación con el diseño de los procesos y de las operaciones de fondeo de un cajón determinado, en particular en este apartado se analiza una nueva disposición, como un camino para la búsqueda de la óptima, de los cables de sujeción del cajón móvil.

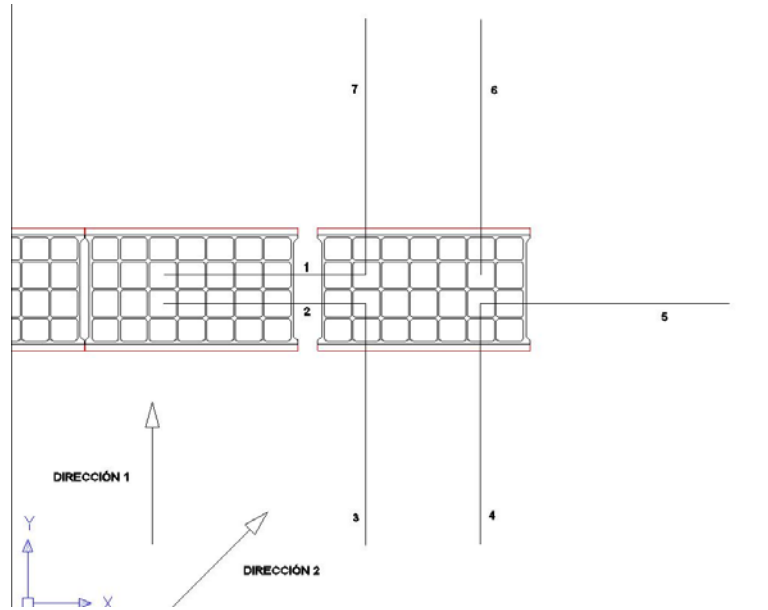


Figura 7.27. Sistema de cables de control y dirección del oleaje

En la Figura 7.27 se muestra una distribución de cables diferente a las anteriores, ubicados perpendicularmente a las paredes del cajón a una cierta distancia de las esquinas y del centro en una disposición no simétrica.

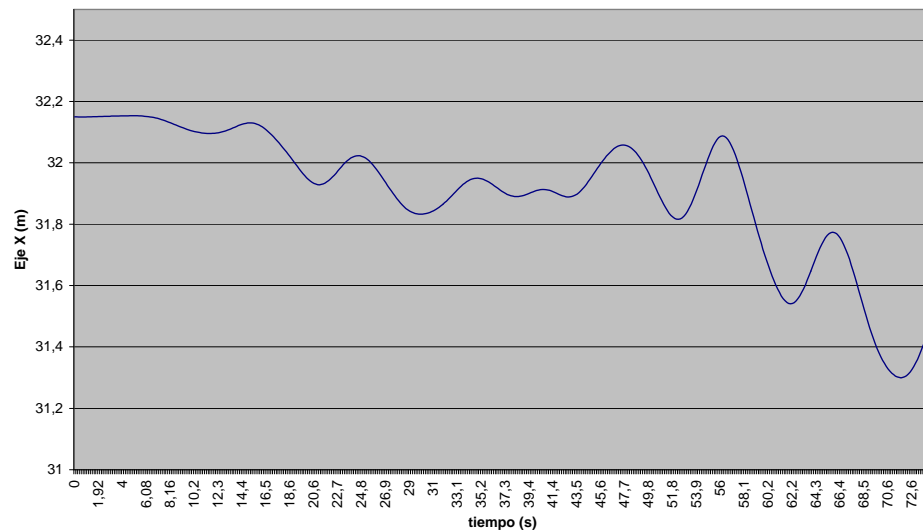


Figura 7.28. Movimiento del centro de gravedad en la dirección perpendicular al oleaje

Los análisis realizados ponen de manifiesto un movimiento sinusoidal del cajón en todas las direcciones, es decir en la dirección perpendicular al oleaje (SURGE), en la dirección del oleaje (SWAY) y en la vertical (HEAVE). El movimiento en la dirección perpendicular al oleaje es oscilatorio con un período casi igual al de la ola de diseño y acerca de forma clara y sostenida el cajón móvil al fijo más próximo de la alineación de referencia, cuestión difícil de pronosticar en un proceso intuitivo.

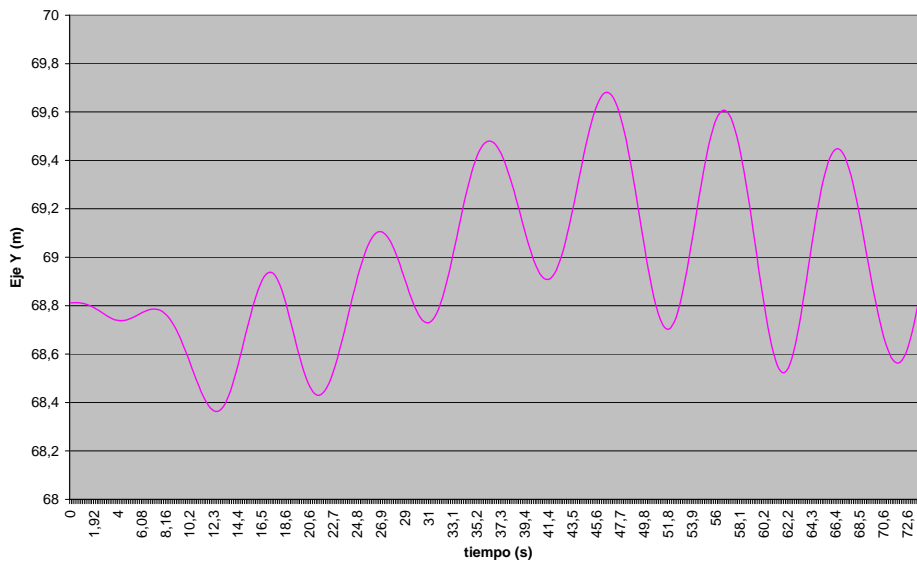


Figura 7.29. Movimiento del centro de gravedad en la dirección del oleaje

El movimiento en la dirección perpendicular al oleaje es oscilatorio con un período casi igual al de la ola de diseño y acerca de forma clara y sostenida el cajón móvil al fijo más próximo de la alineación de referencia, cuestión difícil de pronosticar en un proceso intuitivo.

El movimiento calculado para el centro de gravedad del cajón en la dirección del oleaje es sinusoidal y responde a lo esperable desde el punto de vista intuitivo, con una resultante final que marca una tendencia del cajón móvil de alejarse, ante la acción del oleaje, ligeramente de la pala generadora.

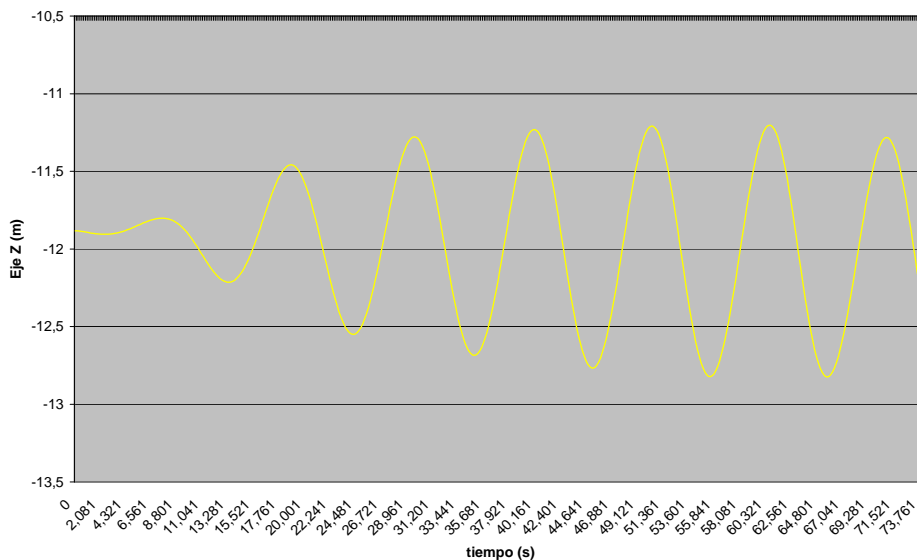


Figura 7.30. Movimiento vertical del centro de gravedad del cajón

Como se puede observar en la Figura 7.30, y tras una primera fase de acomodo, el movimiento vertical del centro de gravedad del cajón móvil no es más que una oscilación alrededor del calado de equilibrio. Hay que destacar que conocer los movimientos del centro

de gravedad del cajón móvil es de gran interés para validar su comportamiento y forma parte de la información que proporciona la respuesta calculada, a pesar de que en los apartados anteriores no se haya hecho mención alguna sobre ellos. Por ejemplo en este caso, la asimetría sostenida del movimiento en la dirección perpendicular al oleaje incidente determina la ubicación y comportamiento de los cables lo que proporciona una llamada de atención sobre el diseño del sistema de sujeción. No resulta difícil trasladar los movimientos del centro de gravedad al cajón, a las paredes y a las esquinas, como un movimiento de sólido rígido y determinar con ello la posibilidad de impacto del cajón móvil con los contornos fijos.

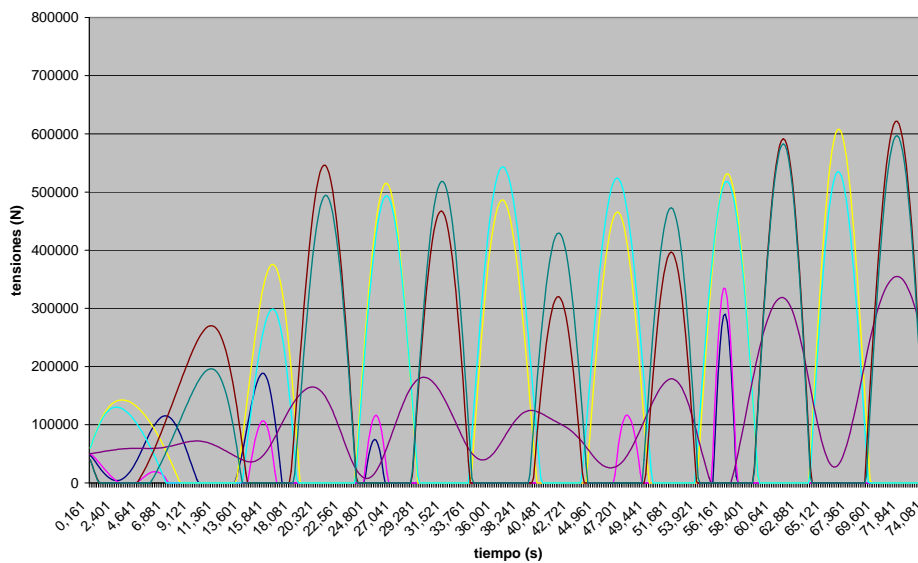


Figura 7.31. Evolución de la tensión en el conjunto de cables considerados

En la Figura 7.31 se muestran los resultados obtenidos para la tensión en todos los cables que constituyen el nuevo sistema de sujeción considerado. En la figura se aprecia que en el tiempo de análisis, todavía no se ha producido la estabilización de las tensiones en alguno de los cables, aunque es cierto que no parece estar lejana. Si se compara con la Figura 7.4 asociado con la sujeción y con el cajón de referencia, el nivel de las tensiones crece en este caso hasta alcanzar un valor máximo próximo a 600 kN.

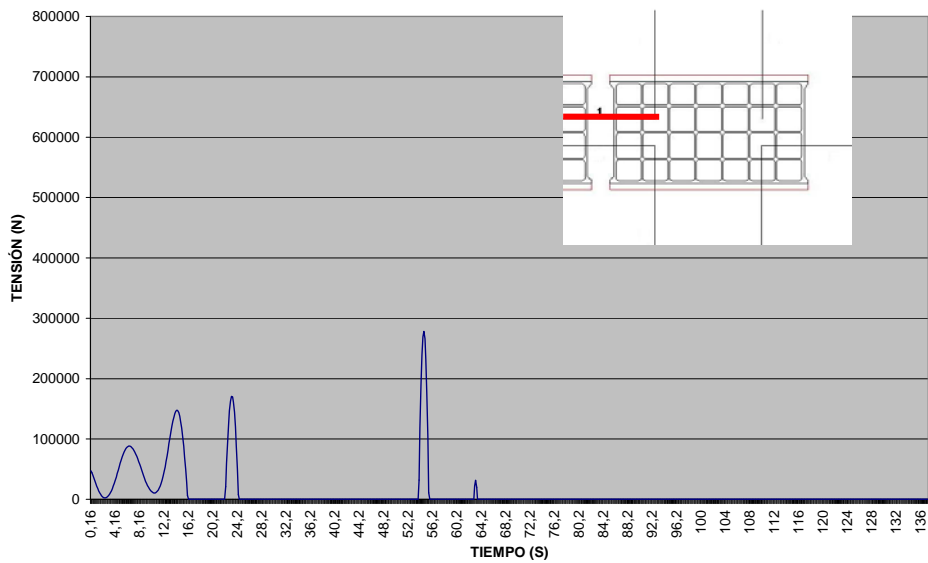


Figura 7.32. Evolución de la tensión en el cable 1

Los cables 1 y 2 trabajan prácticamente de la misma manera, cosa lógica al estar situados en posiciones muy cercanas, y como consecuencia de ello sufren tensiones similares. Apenas están en tensión, 200-300 kN, debido a la asimetría del empuje del mar que acerca el cajón móvil al fijo aunque el cable 2 está más solicitado que el 1 lo que indica un cierto giro durante el movimiento.

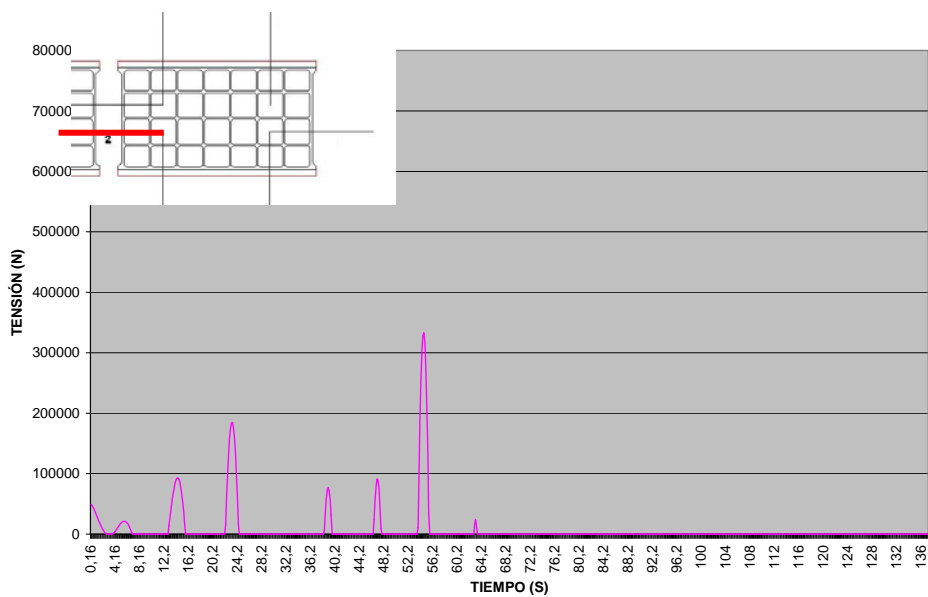


Figura 7.33. Evolución de la tensión en el cable 2

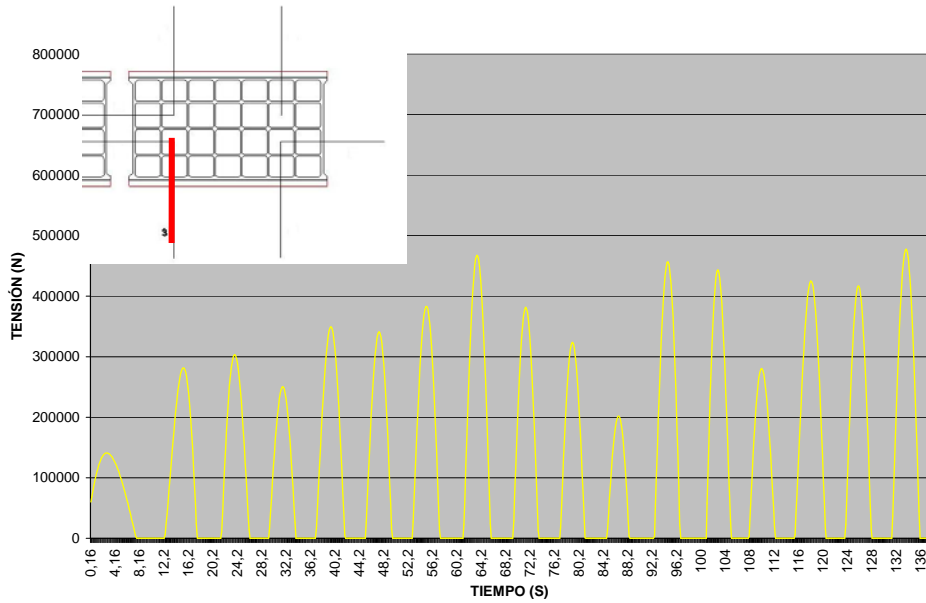


Figura 7.34. Evolución de la tensión en el cable 3

Los cables 3 y 4 sufren tensiones casi idénticas y en ambos casos elevadas, del orden de 600 kN, y varían con un periodo igual al que tiene el oleaje de diseño. Los esfuerzos se alternan con sus simétricos de los cables 6 y 7. Pero mientras que el cable 4 parece que ha alcanzado un valor máximo estacionario, el cable 3 está buscándolo aunque se encuentra en una posición muy cercana.

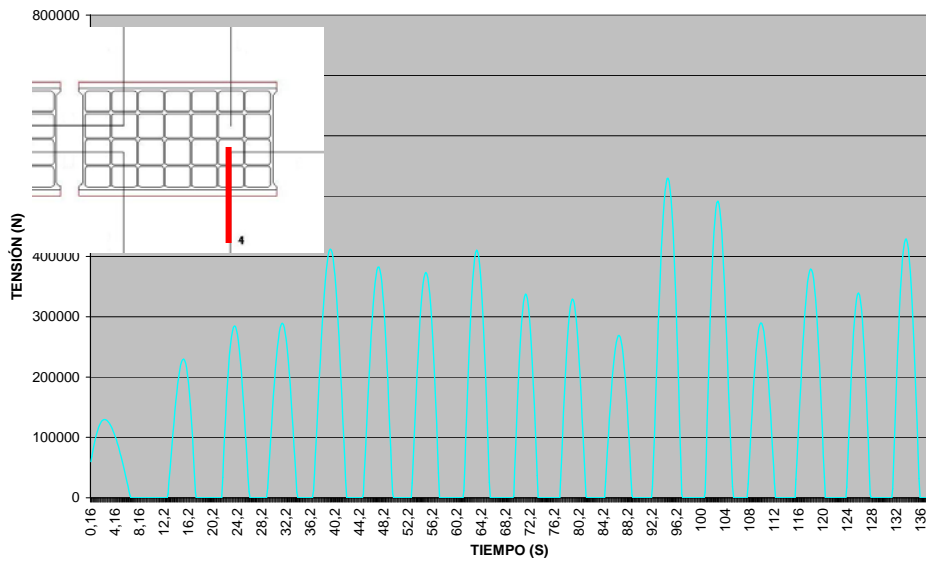


Figura 7.35. Evolución de la tensión en el cable 4

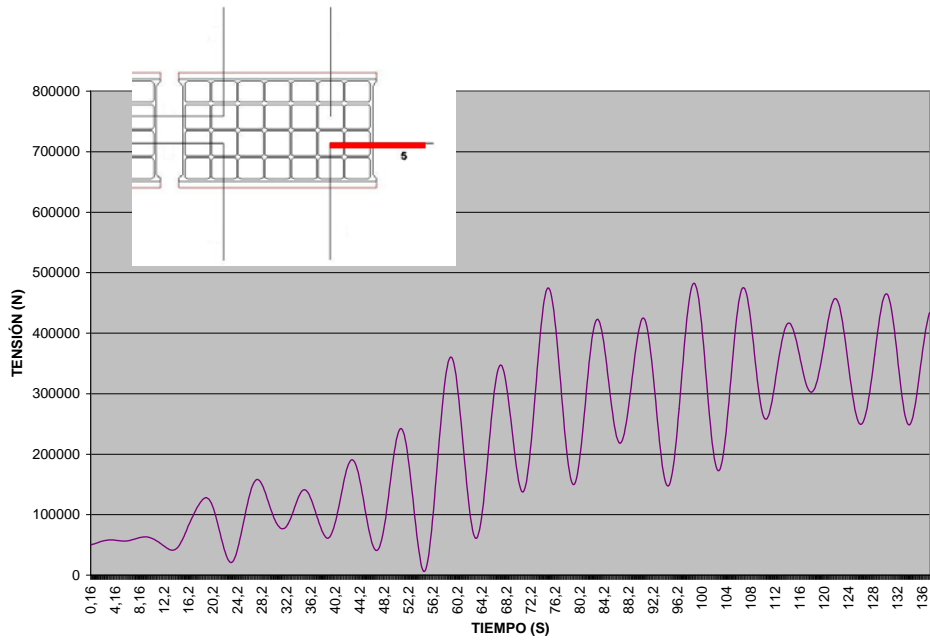


Figura 7.36. Evolución de la tensión en el cable 5

Las tensiones en el cable 5 van creciendo de forma progresiva al acercarse el cajón móvil paulatinamente al fijo. La evolución de la tensión crece en el intervalo considerado en la misma forma que lo hace la tensión en el cable 3, aunque finalmente se estabiliza.

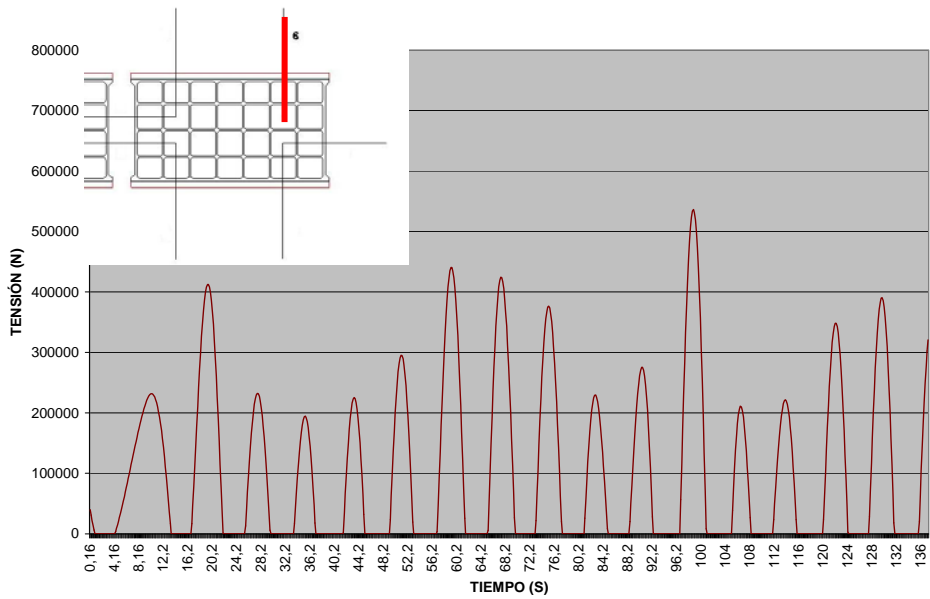


Figura 7.37. Evolución de la tensión en el cable 6

Los cables 6 y 7 se comportan en alternancia con los cables 3 y 4 con tensiones elevadas del orden de 600 kN, oscilando con un período equivalente al que tiene el oleaje de diseño.

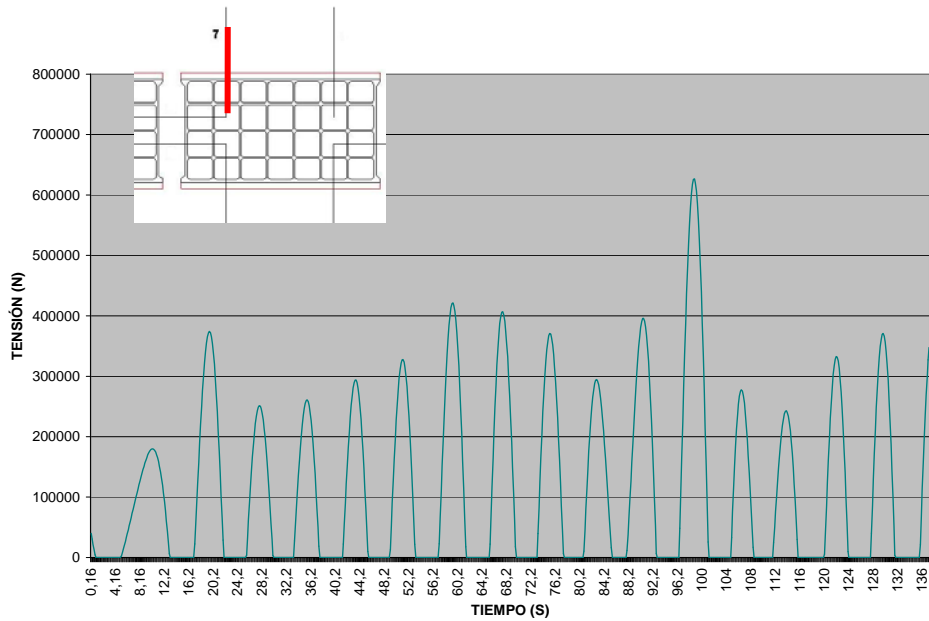


Figura 7.38. Evolución de la tensión en el cable 7

Los resultados obtenidos para los distintos estados de mar se agrupan bajo calificaciones o epígrafes de riesgo, asignándolos a grupos que se denominan: válidos, fallidos y problemáticos. El grupo válido se caracteriza porqué la tensión en ningún cable supera el 55% de la tensión última. Si esto no ocurriera el evento considerado se incluye en el grupo denominado problemático. Cuando en algún cable se supera la tensión última el grupo pasa a denominarse fallido. Nuevamente todos estos asuntos se incorporan al gráfico de la figura 7.39 que se denomina Condiciones de FONDEO dónde con colores verde, amarillo y rojo se visualizan las diferentes respuestas calculadas.

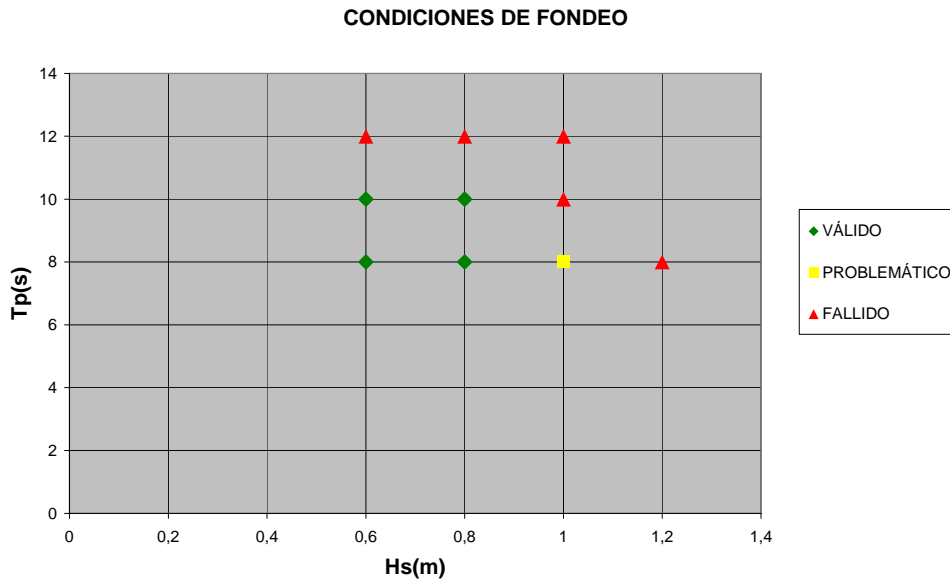


Figura 7.39. Tabla de Obra que valora las condiciones de fondeo en función del estado de mar

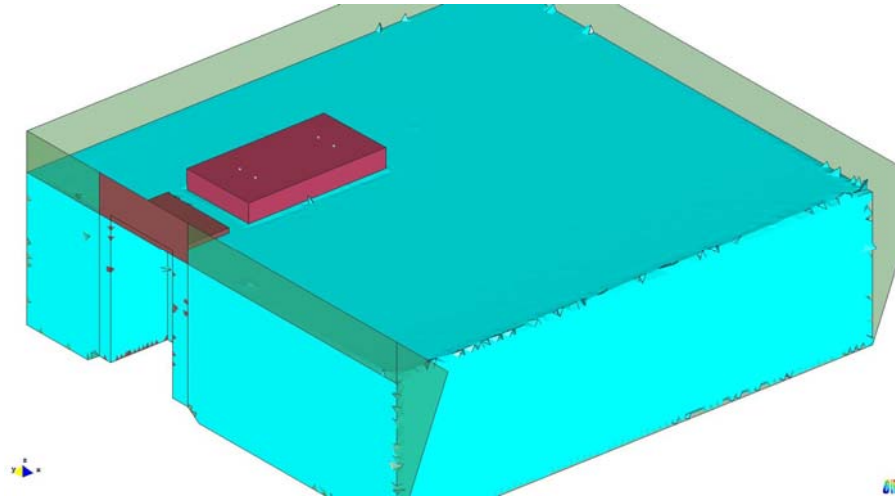


Figura 7.40. Vista general de la simulación realizada

Con independencia del alcance y valor de los resultados presentados en este apartado, la aplicación del método propuesto no ha presentado dificultad adicional alguna, más allá de las propias relacionadas con los recursos informáticos y los tiempos de cálculo necesarios para obtener las soluciones en los intervalos de tiempo requeridos.

7.8 Conclusiones

De los trabajos realizados durante las distintas fases presentadas en este capítulo, especialmente durante la simulación, mediante el método numérico propuesto, de las diferentes situaciones prácticas para determinar las condiciones de fondeo de un cajón flotante, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

El método propuesto representa adecuadamente los fenómenos físicos más significativos involucrados en el fondeo de cajones, especialmente los movimientos del cajón por el efecto del oleaje y las tensiones que se generan en los cables que definen el sistema de colocación y sujeción del cajón móvil.

El modelo numérico necesario para resolver el problema, precisa de una cierta experiencia en su aplicación, sobre todo para encontrar una solución que tenga la calidad requerida. Deben por tanto balancearse durante la aproximación, los recursos informáticos y humanos necesarios; en este sentido el método de discretización de los dominios de análisis mediante cajas propuesto en este trabajo permite desplegar un modelo numérico de calidad y definir un camino de trabajo que da viabilidad al método.

Como en otros muchos problemas físicos, el modelo numérico depende en cierta medida de la respuesta. Por ello en una primera fase es necesario usar un modelo geométrico inicial para determinar las principales peculiaridades de la respuesta, es decir para conocerla cualitativamente y con ello poder actuar con conocimiento de causa sobre el modelo numérico final, por ejemplo sobre el número y dimensiones de las cajas de referencia que lo controlan.

Si se controlan los efectos colaterales que pueden ocasionar la pala generadora del oleaje y los contornos del canal virtual de análisis, todo parece indicar que no serían necesarias series largas de olas para determinar las tensiones máximas en los cables. En este sentido es necesario destacar que en este trabajo para modelar los canales virtuales se reproducen todas aquellas reglas de buenas prácticas que resultan de las múltiples experiencias realizadas en los canales experimentales durante muchos años.

De cualquier manera lo que importa en este estudio no sólo son los valores absolutos de las tensiones en los distintos cables sino también los valores relativos del conjunto. En cualquier caso lo importante de los análisis que se realizan en este trabajo es la coherencia y compatibilidad de los comportamientos calculados con los observados en algunas aplicaciones prácticas de referencia.

Los resultados obtenidos para las distintas posibilidades que presenta un fondeo concreto se empaquetan en un diagrama que relaciona la altura característica con el período de pico de la ola de diseño, cualificando cada punto con un atributo, un color, de riesgo de fondeo, por ejemplo válido, fallido o problemático. Esta metodología permite en la práctica identificar de una forma simple la viabilidad de una determinada operación de fondeo.

No resulta fácil incorporar toda esta problemática a un sistema de ayuda a la decisión (SAD) pues la respuesta es muy dependiente de la geometría del cajón, de la ubicación y características de los cables de sujeción y del estado de mar. Por otro lado el fondeo de cajones es una operación que se programa con tiempo suficiente y por lo tanto no sucede de forma espontánea y de manera irremediable (lo que si ocurre por ejemplo en los rebases o en los vertidos marinos). En este caso la Tabla de Obra que proporciona información sobre la viabilidad de una operación de fondeo juega un papel equivalente a un Sistema de Ayuda a la Decisión.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

8.1 – Conclusiones

A partir del trabajo efectuado en la elaboración de la presente tesina se puede concluir que el PFEM es una herramienta muy potente para estudiar los problemas de interacción entre fluido y estructura para el caso de ingeniería portuaria.

Además el modelo utilizado para simular los procesos estudiados arroja buenos resultados, tal y como se aprecia en la comparación entre los resultados obtenidos con PFEM y los experimentales para el caso de la estabilidad de cubos en un manto de un dique.

No obstante, el modelo presenta aún algunas limitaciones de carácter técnico. Las principales limitaciones son las siguientes:

1. Lentitud en el cálculo para casos tridimensionales de tamaño significativo

Que es de hecho los casos a estudiar en ingeniería marítima. Esta dificultad ha sido uno de los motivos que ha motivado el estudio de secciones bidimensionales –mucho más sencillas y rápidas de calcular- representativas en lugar del caso general tridimensional.

2. Problemas con el mallador para geometrías de aproximadamente más de 5 millones de elementos

Otra importante limitación que impediría el estudio de determinados casos de ingeniería marítima debido a su enorme tamaño. Los anteriores problemas son especialmente evidentes para dominios con mallas de diferentes tamaños o en particular con cambios entre distintas mallas algo acusados.

3. Condición de contorno entre fluido y estructura no del todo realista

El problema es que los nodos correspondientes a las condiciones de contorno no están situados sobre el mismo contorno, sino separados a una distancia de un elemento del mismo. Esto provoca que las condiciones de contorno no estén del todo ajustadas a la realidad y el comportamiento del problema en las fronteras sea algo diferente de lo esperado.

8.2 – Investigación futura

A partir de los resultados obtenidos a lo largo del documento y de las conclusiones extraídas es evidente que aún queda mucho trabajo por hacer en el campo de la interacción fluido estructura.

Seguidamente se mencionan algunas facetas del PFEM que habría que mejorar. Las futuras líneas de trabajo propuestas se pueden clasificar en dos categorías. En la primera categoría se engloban las limitaciones del modelo actual y se han mencionado en el apartado de conclusiones. En la categoría siguiente se encuentran las mejoras del modelo que harían posible la aplicación del mismo en un abanico de situaciones mucho más amplio. Así pues, las mejoras más inmediatas a realizar al modelo actual son las siguientes:

1. Optimización del código

Intentar reducir el tiempo de cálculo de PFLOW en la medida de lo posible. Esto incluye el uso de clusters para la realización de los cálculos y la posibilidad de paralelizar el mismo código. La paralelización del mallado, no obstante, es un tema muy complicado y objeto de investigación intensiva en la actualidad.

2. Solución de los problemas con el mallador

Queda pendiente la resolución de los problemas existentes a la hora de mallar dominios muy grandes del orden de varios millones de tetraedros.

3. Mejora del tiempo de cálculo por zonas

El código está actualmente implementado según una formulación totalmente lagrangiana. Esto obliga en general a utilizar pasos de tiempo reducidos que incrementan el tiempo de cálculo total. Se plantea entonces la posibilidad de implementar formulaciones ALE (formulación euleriana-lagrangiana arbitraria) en zonas apropiadas que permitan incrementar el valor del paso de tiempo y, con ello, reducir el tiempo de cómputo total del problema.

4. Mejora de la condición de contorno

Habría que intentar mejorar la implementación de las condiciones de frontera de tal forma que el comportamiento del problema a estudiar se ajuste más a la realidad.

CAPÍTULO 9: REFERENCIAS

9.1 – Referencias

- [1] Donea, J; Huerta, A. *Finite Element Method for flow problems*. J. Wiley. 2003.
- [2] Idelsohn, S.R.; Oñate, E.; Del Pin, F.; Calvo, N. *Lagrangian formulation: the only way to solve some free-surface fluid mechanics problems*. Fifth World Congress on Computational Mechanics, Mang HA, Rammerstorfer FG, Eberhardsteiner J (eds), July 7-12, Viena, Austria. 2002.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Oñate, E.; García, 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.
- [7] 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.
- [8] Oñate, E. et al. *The Particle Finite Element Method. An Overview*. International Journal of Computational Methods. Vol. 1 No. 2, 267–307. 2004.
- [9] Oñate, E. et al. *Advances in the particle finite element method for the analysis of fluid-multibody interaction and bed erosion in free surface flows*. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 197:1777-1800. 2008.

9.2 – Software utilizado

- [P1] *GiD. The personal pre/postprocessor*. www.gidhome.com. CIMNE, Barcelona. 2009.
- [P2] *PFLOW*. CIMNE, Barcelona.