



PROYECTO FINAL DE CARRERA

**ESTUDIO Y
OPTIMIZACIÓN DE UNA
CARENA MEDIANTE CFD**

Autor: Jordi Tolsà García

Tutor: Francisco Blasco Lloret

Cartagena, Abril 2012

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CARENA MEDIANTE CFD

El proyecto "Estudio y optimización de una carena mediante CFD" trata, de estudiar e intentar mejorar la carena de un buque mediante la colocación de un bulbo. Todo esto haciendo un análisis mediante un programa de análisis por elementos finitos, como es el Tdyn.

Primeramente se hace una introducción al análisis CFD, a la mecánica de fluidos y al Tdyn.

Seguidamente, el proyecto también incorpora un tutorial de introducción al Tdyn en donde se analiza el casco de un buque llamado Wigley. Aquí se pueden seguir todos los pasos necesarios para realizar un análisis CFD de un buque.

Finalmente, se hace un análisis CFD de la carena original y otro análisis de la carena modificada, a la que se le ha incorporado el bulbo. Este análisis será prácticamente, siguiendo los pasos del análisis de la carena Wigley y se hace también utilizando el programa de análisis por elementos finitos, Tdyn. Una vez obtenidos los resultados, estos se comparan, se comentan y se redactará una conclusión que dirá si la modificación de la carena ha sido o no satisfactoria.

STUDY AND OPTIMIZATION OF A HULL USING CFD ANALYSIS

The project "Study and optimization of a hull using CFD analysis" try to study and to improve the hull of a vessel incorporating a bulb. All this with analysis using a program of finite element analysis, as is the Tdyn.

First of all, there is an introduction to CFD analysis, introduction to the fluid mechanics and Tdyn.

Next, the project also includes a tutorial introduction to Tdyn which analyzes the hull of a ship called Wigley. Here you can follow all the steps necessary to perform CFD analysis of a ship.

Finally, it's made an CFD analysis of the original hull and further analysis of the modified hull, which has been incorporated into the bulb. This analysis will be virtually following the steps of analyzing the Wigley hull and is also using the program, Tdyn. After obtaining the results, these will be compared, discussed and a conclusion will be written to tell if the modification of the hull has been successful or not.

Índice

1	Introducción	8
2	Dinámica de fluidos	9
2.1	¿Qué es la dinámica de fluidos?	9
2.2	Principios Básicos de la Dinámica de Fluidos	10
2.2.1	Concepto de Fluido.....	10
2.2.2	Fluidos ideales.....	10
2.2.3	Hipótesis del medio continuo	10
2.2.4	Tipos de fluidos.....	11
2.2.5	Propiedades de los fluidos.....	12
2.2.6	Estudio del comportamiento de los fluidos	14
3	CFD (Computational Fluid Dynamics)	19
3.1	Concepto de CFD	19
3.2	Antecedentes e historia de los CFD	20
3.3	Campos Hidrodinámicos de los CFD	21
3.4	Método de Dawson	23
3.5	Metodología en los CFD	24
3.6	La validación de los CFD	27
4	Tdyn	30
5	Ejemplo del casco Wigley en agua dulce	36
5.1	Introducción	36
5.2	PRE PROCESO	37
5.3	Start Data	38
5.4	Creación de la geometría y el volumen de control	39
5.5	Tdyn Data	41
5.6	Generación de malla	51
5.7	Cálculo	55
5.8	Post-proceso	56

5.8.1	Control de animaciones	59
5.8.2	Selección de mallas	59
5.8.3	Selector de resultados	60
5.8.4	Selección de preferencias.....	61
5.8.5	Opciones del menú contextual.....	62
5.9	Resultados	63
6	Caso práctico de la carena de un buque.....	80
6.1	Geometría.....	80
6.2	Creación del bulbo	83
6.3	Análisis	87
6.3.1	Condiciones de contorno	89
6.3.2	Datos fluid dynamics & multi-physics	90
6.3.3	Modules data	90
6.3.4	Condiciones iniciales	91
6.3.5	Condiciones de contorno	91
6.3.6	Materiales	94
6.3.7	Generación de malla.....	94
6.3.8	Cálculo.....	95
7	Resultados	96
7.1	Resultados de la carena sin bulbo.....	96
7.2	Resultados de la carena con bulbo	111
7.3	Comparación de los resultados	125
8	Conclusión.....	132
	Bibliografía	133

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Dibujo cualitativo de flujo sobre cilindro.....	12
Ilustración 2: Ejemplo de osmosis.....	13
Ilustración 3: Ejemplo de flujo laminar a la izquierda y flujo turbulento a la derecha.....	14
Ilustración 4: En el enfoque Lagrangiano (izquierda) los componentes de la discretización son las propias partículas del fluido. En el enfoque Euleriano (derecha) se discretiza el volumen que ocupa el fluido	15
Ilustración 5: Ejemplo Principio de Bernoulli.....	19
Ilustración 6: Circuito de refrigeración para una central nuclear	31
Ilustración 7: Análisis en olas de una embarcación de semi-planeo I.....	32
Ilustración 8: Estructura semi-sumergible para producir energía de olas.....	32
Ilustración 9: Análisis del flujo de sangre sobre un aneurisma cerebral real.....	32
Ilustración 10: Simulación del remolque una embarcación en aguas tranquilas	33
Ilustración 11: Propagación de ondas de gravedad	33
Ilustración 12: Análisis hidrodinámico de un yate de la Copa América.....	33
Ilustración 13: Experimento sobre el impacto del agua en cubiertas de barcos.....	33
Ilustración 14: Vorticidad - Capa de mezcla	34
Ilustración 15: Simulación del enfriamiento de un molde de un envase de vidrio	34
Ilustración 16: Análisis termo-mecánico de un envase de vidrio.....	34
Ilustración 17: Acoplamiento fluido-estructura (FSI) de un conducto de un hélice.....	35
Ilustración 18: Flujo de sangre en la bifurcación de la carótida.....	35
Ilustración 19: Análisis del impacto del agua en un tanque 2D	35
Ilustración 20: Casco Wigley	36
Ilustración 21: Menú Start Data del Tdyn	39
Ilustración 22: Volumen de control del ejemplo Wigley	40
Ilustración 23: Menú interno (Tdyn Data).....	41
Ilustración 24: Apartado Fluid Dynamics & Multi-Physics del menú Data	42
Ilustración 25: Apartado de Solve Fluid en el menú Data	43
Ilustración 26: Apartado de Analysis en el menú Data	43
Ilustración 27: Apartado de Fluid Solver en menú Data	45
Ilustración 28: Apartado de Tubulence en menú Data.....	45
Ilustración 29: Apartado de Initial and Conditional Data en el menú Data.....	47
Ilustración 30: Menú de Wall/Bodies.....	48
Ilustración 31: Dibujo que muestra las condiciones de contorno de las superficies	48
Ilustración 32: Menú de Pressure Field	49
Ilustración 33: Menú de Velocity Field.....	49
Ilustración 34: Menu de Free Surface.....	50

Ilustración 35: Menú selección de material.....	51
Ilustración 36: Menú de generación de malla.....	52
Ilustración 37: Valor del tamaño de la malla en una superficie	53
Ilustración 38: Progreso de la generación de malla	53
Ilustración 39: Malla generada.....	54
Ilustración 40: Ventana de dialogo de la malla generada.....	54
Ilustración 41: Ventana del proceso de cálculo.....	55
Ilustración 42: Icono post-proceso	56
Ilustración 43: Imagen del post-proceso	57
Ilustración 44: Menú del post-proceso.....	58
Ilustración 45: Imagen del control de animaciones.....	59
Ilustración 46: Imagen del menú del post-proceso donde se puede seleccionar las capas tipo de visualización ect.	60
Ilustración 47: Selección de resultados.....	61
Ilustración 48: Selección de preferencias	62
Ilustración 49: Menú contextual	62
Ilustración 50: Geometría del buque a analizar.....	81
Ilustración 51: Geometría recortada.....	81
Ilustración 52: Geometría de la obra viva	82
Ilustración 53: Colocación del punto de origen	83
Ilustración 54: Vista lateral del bulbo	84
Ilustración 55: Vista de la planta del bulbo	84
Ilustración 56: Vista de casco y bulbo	85
Ilustración 57: Unión de casco y bulbo.....	85
Ilustración 58: Superficie del casco y bulbo unidas.....	86
Ilustración 59: Superficie creada para la unión de bulbo y casco	86
Ilustración 60: Creación de la superficie de la quilla	87
Ilustración 61: Volumen de control de la carena sin bulbo.....	88
Ilustración 62: Menú Start Data	89
Ilustración 63: Datos del apartado fluid dynamis & multi-physics.....	90
Ilustración 64: Modules Data para la carena a analizar	90
Ilustración 65: Menú de condiciones iniciales	91
Ilustración 66: Condiciones de contorno de la carena a analizar	91
Ilustración 67: Menú Wall type.....	92
Ilustración 68: Menu Pressure Field.....	92
Ilustración 69: Menú Velocity Field.....	93
Ilustración 70: Menú Velocity Field.....	93
Ilustración 71: Selección de material	94
Ilustración 72: Menú generación de malla	95

1 Introducción

El objetivo del siguiente proyecto será comprobar mediante CFD's, la eficiencia de una carena, si esta es más eficiente sin bulbo o con bulbo. Para ello se le incorporará un tipo de bulbo. Pero no solo será ese el objetivo del proyecto, para hacer todo lo dicho será necesario aprender a utilizar un programa de ordenador llamado Tdyn. Dicho programa utiliza métodos de discretización como herramienta de cálculo. Se comprobará mediante la utilización de dicho programa, cuál será la carena más eficiente si la carena original o alguna de las que se le incorporará un bulbo.

Lo que se pretende con este proyecto es hacerse una idea del alcance y la utilización de los CFD, una herramienta en continuo desarrollo y utilizada en numerosos campos más, aparte de la ingeniería Naval.

Para la realización de este proyecto se ha elegido una compañía de ingeniería y sistemas, Compass, ya que esta compañía ha facilitado el Tdyn. Compass ofrece un conjunto de programas de software para la simulación y el cálculo estructural en diferentes ámbitos de la ingeniería. Todos ellos están basados en el método de los elementos finitos. De esta manera, una vez realizado el aprendizaje de uno de ellos, se accede de manera natural a cualquier otro de los productos de la gama. Las disciplinas que engloban estos sistemas incluyen análisis fluido-dinámico, análisis de problemas térmicos acoplados y cálculo estructural entre otros. En este proyecto solo veremos el sistema que se necesita para la realización del proyecto, la utilización del análisis fluido-dinámico.

Los productos para la simulación y el cálculo estructural comercializados por COMPASS son los siguientes:

- **Tdyn:** es un entorno tridimensional de análisis fluido-dinámico (CFD) y multifísico basado en el método de los elementos finitos estabilizado.
- **RamSeries:** es un entorno de análisis estructural y de cálculo de sólidos tridimensionales basado en el método de los elementos finitos.

En estos dos productos está integrado el Custom GiD, un programa de pre/post-proceso que permite crear o tratar con facilidad complejas geometrías, generar malla sobre ellas y, una vez finalizado el análisis, visualizar los resultados.

Como los CFD se basan en la dinámica de fluidos lo primero que se hará será hacer un resumen sobre la dinámica de fluidos.

2 Dinámica de fluidos

Seguidamente se hará un breve resumen de introducción a la dinámica de fluidos, una rama de la mecánica de fluidos. Se hablará sobre que es la dinámica de fluidos, cuáles son sus principios, etc.

2.1 ¿Qué es la dinámica de fluidos?

La dinámica de fluidos es una rama de la física relativamente reciente (comienzos del siglo XX), aunque los conceptos en los que se basa se remontan a la antigua Grecia, a los trabajos teóricos de Leonardo Da Vinci, y posteriormente al trabajo de un gran número de físicos como Torricelli, Euler, Bernoulli, etc.

La dinámica de fluidos estudia los movimientos de los fluidos (gases y líquidos), debido a la acción de fuerzas, o a su interacción con otros medios y con el contorno que los delimita.

En realidad la dinámica de fluidos forma parte de un campo más amplio denominado mecánica de fluidos, del cual derivan tanto la estática de fluidos (estudia los fluidos en reposo), como la dinámica de fluidos (estudia los fluidos en movimiento).

En la actualidad, la mecánica de fluidos es una parte esencial de muchas áreas de la tecnología y la ciencia actual, destacando su papel en el diseño de toda clase de vehículos (aviones, barcos, coches, etc.), estudios del flujo de aire atmosférico, medicina y biología (flujo de sangre y otros fluidos), ingeniería industrial, etc.

2.2 Principios Básicos de la Dinámica de Fluidos

2.2.1 Concepto de Fluido

Para determinar si un cuerpo es o no un fluido no debemos fijarnos en su composición, sino más bien en su comportamiento.

Un fluido es un cuerpo que carece de elasticidad de forma, es decir, que no tiene forma propia y por tanto se adapta a la forma del recipiente que lo contiene. Además, un fluido se deforma de forma continua ante la aplicación de un esfuerzo cortante (a diferencia de los sólidos, no tienen ninguna resistencia a este tipo de fuerzas).

Comparándolos con los sólidos, se puede decir que las moléculas de los sólidos están fuertemente unidas entre sí, mientras que en los líquidos pueden moverse libremente y separarse sin ofrecer apenas resistencia. Un sólido, ante la aplicación de una fuerza cortante, no se deforma de manera continua, sino mediante una deformación o desplazamiento definido.

2.2.2 Fluidos ideales

Estudiar de forma precisa todas las variables que intervienen en un fluido real puede ser extremadamente complejo. Por este motivo, es necesario partir de una serie de hipótesis y simplificaciones que hacen posible el estudio de estos sistemas, obviando los factores menos importantes o prácticamente inapreciables.

Por tanto, muchas veces no se estudian los fluidos reales, sino los llamados fluidos ideales. Estos básicamente se diferencian de los fluidos reales en que se desprecia el efecto de las fuerzas viscosas. En otras palabras, en los fluidos ideales se considera que no existe fricción interna entre las partículas del fluido.

2.2.3 Hipótesis del medio continuo

Además de considerar los fluidos ideales, uno de los cimientos de la dinámica de fluidos es la hipótesis del medio continuo, que consiste en asumir que el fluido es continuo a lo largo de todo el volumen que ocupa. Esto simplifica mucho el problema, ya

que se puede asumir que todas las magnitudes del fluido que queremos estudiar van a regirse siempre por funciones continuas.

Esta hipótesis, al igual que la de los fluidos ideales, no siempre es aplicable, dependiendo en este caso de una magnitud medible denominada número de Knudsen. Cuando esta hipótesis no es aplicable, es necesario recurrir a la mecánica estadística en lugar de a la mecánica de fluidos.

2.2.4 Tipos de fluidos

Existen muchas formas de clasificar los fluidos, de las cuales mencionamos las más importantes.

- Gases - Líquidos

Existen dos tipos fundamentales de fluidos, que son los líquidos y los gases. Los líquidos se caracterizan por poseer fuerzas de cohesión entre sus moléculas, que provocan una fuerte tendencia a que el fluido mantenga su volumen constante.

Por el contrario, los gases apenas poseen fuerzas de cohesión, por lo que se pueden expandir tratando de ocupar el máximo volumen.

- Compresibles – No Compresibles

Todos los fluidos son compresibles en mayor o menor medida, por lo que en realidad cuando se habla de fluidos no compresibles se refiere a fluidos en los que esta propiedad es despreciable.

Un fluido es más compresible cuanto mayor es el cambio que sufre en su densidad al aplicarle una presión externa. Por tanto, los gases son fluidos muy compresibles, mientras que los líquidos en general se suelen considerar no compresibles.

- Newtonianos – No newtonianos

Un fluido newtoniano es aquel en el que su viscosidad no varía en función de la tensión que se le aplica. Por tanto, su viscosidad es un valor constante.

En los fluidos no newtonianos, la viscosidad no es constante, por lo que se puede decir que en cierto modo se comportan como sólidos cuando se les aplica una presión, y como líquidos cuanto menor es la presión (o bien al contrario, como ocurre con los fluidos no newtonianos tixotrópicos).

2.2.5 Propiedades de los fluidos

Se enumerarán aquí las principales propiedades de los fluidos:

- Viscosidad

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Si se considera que el fluido está constituido por una serie de capas, la viscosidad representaría el rozamiento entre las diferentes capas cuando se les aplica una fuerza.

Los gases presentan muy poca viscosidad, mientras que los sólidos representan el caso contrario de máxima viscosidad.

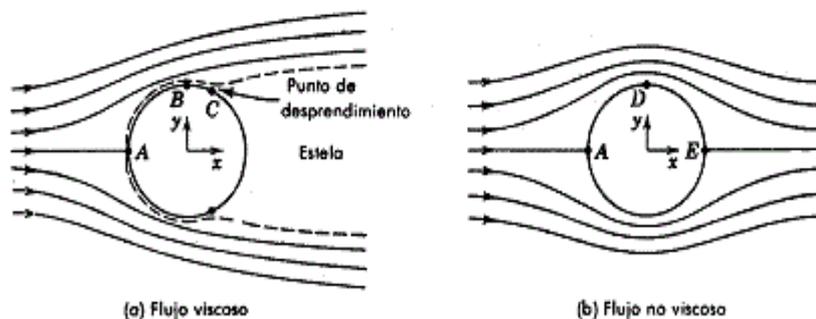


Ilustración 1: Dibujo cualitativo de flujo sobre cilindro

- Densidad

La densidad es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia. Suele denotarse con la letra ρ .

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Siendo m = masa(kg) y v = volumen(m^3) , por tanto ρ = densidad (kg/m^3).

- Convección

La convección tiene una importancia fundamental en la meteorología del planeta, ya que es el fenómeno por el cual se mueven las capas de aire que tienen diferentes temperaturas. El aire caliente es menos denso que el frío, por lo que tiende a ascender. Este movimiento provoca una transferencia de calor hacia las capas altas de la atmósfera, que es en sí lo que llamamos convección.

- Advección

La advección es el fenómeno de transporte de una magnitud escalar cualquiera a lo largo de un fluido. Esta magnitud podría ser por ejemplo el calor, por lo que es en realidad un término más general que el de la convección.

- Difusión

Se llama difusión a cualquier proceso físico por el cual se transfieren partículas de un medio a otro. El ejemplo más típico de difusión es la ósmosis.

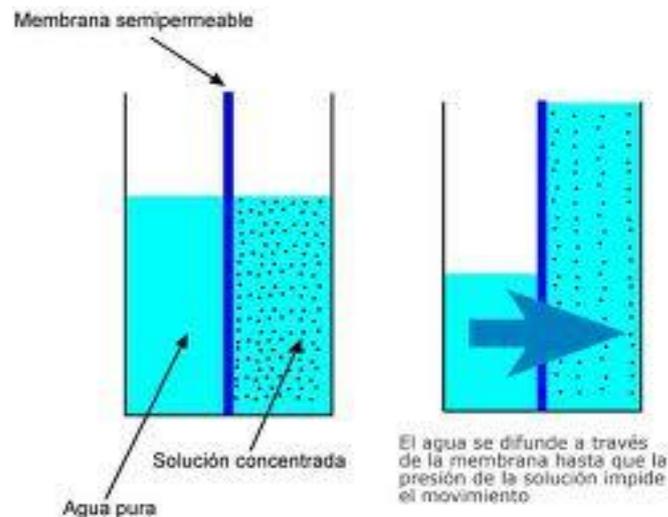


Ilustración 2: Ejemplo de osmosis

- Flujo laminar

Existen básicamente dos formas en las que se puede mover un fluido: siguiendo un flujo laminar, o un flujo turbulento.

El flujo laminar es el más ordenado, ya que el fluido se mueve únicamente en el sentido de la corriente. Un fluido que sigue un flujo laminar es relativamente fácil de estudiar. Para determinar cuándo un fluido seguirá un flujo laminar o un flujo turbulento, se utiliza el número de Reynolds, que es una magnitud adimensional que relaciona los términos convectivos y viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes (que veremos más adelante).

- Flujo turbulento

Un fluido que sigue un flujo turbulento es, en la actualidad, imposible de estudiar de forma precisa, por lo que su comportamiento es aparentemente caótico. Los flujos turbulentos se caracterizan por la aparición de remolinos.

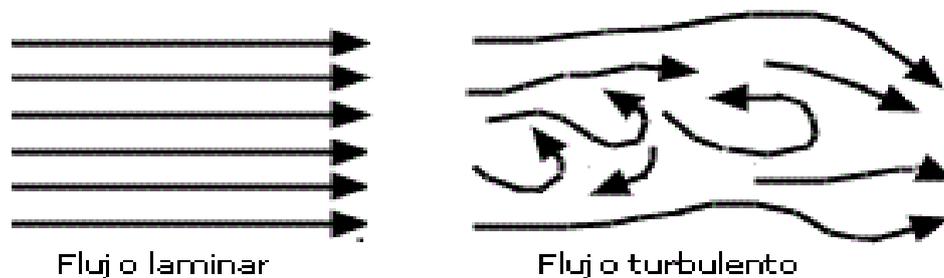


Ilustración 3: Ejemplo de flujo laminar a la izquierda y flujo turbulento a la derecha

2.2.6 Estudio del comportamiento de los fluidos

El estudio de los fluidos consiste en conocer las velocidades, presiones y fuerzas internas de las partículas que forman el fluido, en función de las fuerzas externas que se aplican sobre el fluido, y del contacto con otros medios (por ejemplo, el recipiente que contiene el fluido).

Cuando se habla de contacto con otros medios, destaca la interacción entre el fluido y un sólido, teniendo en cuenta que el sólido se puede encontrar estático o en movimiento, y que además, en el caso más complejo, el sólido podría ser deformable. Este último caso podría dar lugar a una variación del volumen disponible para el fluido, lo cual en algunos casos (como en los gases) podría obligarnos a tener que estudiar también las variaciones de densidad del fluido.

En cualquier caso, el estudio de la dinámica del fluido puede hacerse bien de forma analítica o de forma numérica, siendo este último caso el que nos interesa desde el punto de vista de la informática gráfica.

- ¿Enfoque Lagrangiano o Euleriano?

Si se pretende conocer los movimientos de las partículas del fluido se puede abordar el problema desde dos enfoques totalmente diferentes.

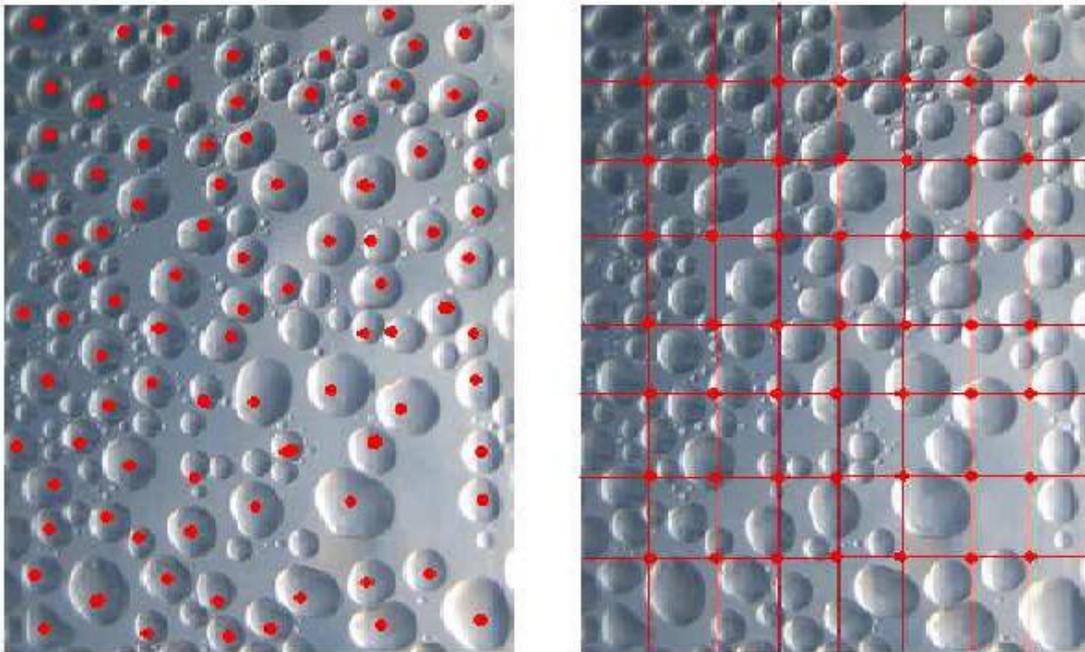


Ilustración 4: En el enfoque Lagrangiano (izquierda) los componentes de la discretización son las propias partículas del fluido. En el enfoque Euleriano (derecha) se discretiza el volumen que ocupa el fluido

La primera idea sería estudiar el movimiento de cada partícula en concreto, siguiendo su recorrido según se desplaza por el fluido. Este sería el enfoque Lagrangiano.

La segunda idea sería fijarse en un punto concreto del espacio que abarca el fluido, y estudiar los movimientos que se producen debido a las partículas que atraviesan ese punto fijo. Este sería el enfoque Euleriano.

Hay un símil que ayuda a aclarar estos conceptos, imaginando que en lugar de estudiar las partículas de un fluido se estuviera estudiando una multitud de personas. En este símil, el enfoque Lagrangiano consistiría en escoger a un individuo concreto y seguir todos sus pasos según camina por la calle. En cambio, el enfoque Euleriano consistiría en fijarse en un punto concreto de la calle, como la puerta de un bar, y estudiar a cada persona que entra y sale del bar.

En cualquier caso, ambos enfoques se basan en una discretización (ya sea del espacio, o de la propia materia del fluido), y el estudio debe realizarse sobre cada uno de los elementos obtenidos en la discretización.

- Ecuación de continuidad:

-Forma integral:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \, d\Omega = - \int_{\partial\Omega} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \, d(\partial\Omega)$$

-Forma diferencial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- Ecuación de cantidad de movimiento:

-Forma integral:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} \, d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \, d\partial\Omega = \int_{\partial\Omega} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} \, d\partial\Omega + \int_{\Omega} \rho \mathbf{f} \, d\Omega$$

-Forma diferencial:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}.$$

- Ecuación de la energía

-Forma integral:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \, d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, d\partial\Omega = \int_{\partial\Omega} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v} \, d\partial\Omega + \int_{\Omega} \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} \, d\Omega - \int_{\partial\Omega} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} \, d\partial\Omega$$

-Forma diferencial:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) = -\nabla \cdot (p\mathbf{v}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}' \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (k\nabla T)$$

- Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones que definen el comportamiento dinámico de un fluido. Derivan de aplicar los principios de conservación de la mecánica y de la termodinámica al fluido, de donde se obtiene una formulación integral que generalmente se suele transformar en una formulación diferencial más práctica.

Existen diferentes formulaciones para estas ecuaciones, en función del problema que se desea resolver. A modo de ejemplo, se mostrará la ecuación de movimiento de un fluido incompresible y con densidad uniforme:

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}.$$

En el lado izquierdo de la ecuación se encuentra el movimiento (variación del desplazamiento en el tiempo), y en el derecho los siguientes términos:

- F: Fuerzas aplicadas al fluido.
- p: presión en el fluido.
- ρ : densidad del fluido.
- ν : viscosidad del fluido.
- u: desplazamiento

Es importante recordar el significado del operador Nabla:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{F} - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}$$

Y del operador Laplaciano:

$$(\nabla * \nabla)\phi = \phi * \nabla^2$$

En este caso, el operador Nabla se utiliza para el cálculo del gradiente de presión, lo cual no se debe confundir con la divergencia (si hubiera un símbolo de producto escalar entre el operador y la presión), o con el rotacional (si hubiera un símbolo de producto vectorial entre el operador y la presión).

- Ecuaciones de Euler

A pesar de que estas ecuaciones son un caso específico de las ecuaciones de Navier-Stokes, en realidad fueron enunciadas con anterioridad. De hecho, Claude-Louis Navier partió de las ecuaciones de Euler para obtener una generalización de las mismas que, posteriormente justificó George Stokes para dar lugar a las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Euler definen el movimiento de un fluido en el caso especial de fluidos compresibles y no viscosos.

- Principio de Bernoulli

Este teorema es de gran importancia en el estudio de la dinámica de fluidos, ya que nos proporciona una relación entre la presión y la velocidad dentro del fluido. Estrictamente hablando, este principio sólo se cumple en fluidos ideales (no compresibles), pero en la práctica se aplica en el diseño de superficies aerodinámicas (alas, hélices, etc.).

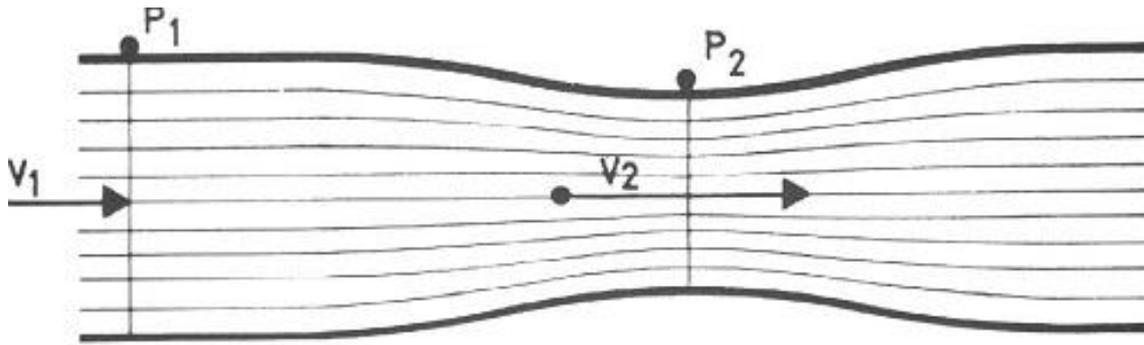


Ilustración 5: Ejemplo Principio de Bernoulli

Sin entrar en fórmulas, la idea básica del teorema de Bernoulli es que la presión en un fluido con flujo uniforme, disminuye cuando aumenta la velocidad. Esto es consecuencia de que la energía total del fluido permanece constante.

3 CFD (Computacional Fluid Dynamics)

En este apartado se explicará el concepto de CFD, su utilización, etc.

3.1 Concepto de CFD

El resolver un problema de mecánica de fluidos, en este caso, un problema de mecánica de fluidos aplicado a la ingeniería naval, mediante aproximaciones matemáticas con la ayuda del ordenador constituye la base de los denominados CFD, siglas de la expresión inglesa "Computational Fluid Dynamics", cuya traducción podría ser la de Dinámica de Fluidos Computarizada. Los CFD's son una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujo de fluidos. Los ordenadores se usan para realizar los cálculos necesarios y simular la interacción de líquidos y gases con superficies definidas

por las condiciones de contorno . Se podrán lograr mejores soluciones cuanto más rápido y mejor sea el ordenador.

3.2 Antecedentes e historia de los CFD

La base fundamental de casi todos los problemas de CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes , que definen el flujo de gas líquido de una sola fase. Estas ecuaciones se pueden simplificar mediante la eliminación de los términos que describe la viscosidad para obtener la ecuación de Euler . Una mayor simplificación, mediante la eliminación de los términos que describen el rendimiento de las ecuaciones de vorticidad potencial. Finalmente, estas ecuaciones se pueden linealizar para obtener el potencial de las ecuaciones linealizadas .

Existe mucha historia sobre los CFD's al margen del campo de la ingeniería naval, en campos como la aeronáutica, ingeniería industrial, etc. Aquí se va a enfocar más bien a la historia y antecedentes de los CFD en lo que es el campo Naval.

La utilización de los Canales de Ensayos Hidrodinámicos, a través de la investigación experimental con modelos, ha sido desde hace tiempo el único medio de predicción del comportamiento del flujo y de las fuerzas que actúan sobre el buque.

No obstante, la introducción de análisis matemáticos ha cuestionado la necesidad y prioridad de los ensayos realizados con modelos.

Aunque los primeros análisis matemáticos de un flujo fluido comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XVIII, cuando Laplace, Bernoulli y Euler establecieron las ecuaciones básicas de la Mecánica de Fluidos, de hecho, su utilización para aplicaciones en ingeniería fue escasa debido a la complejidad de su estructura y falta de recursos numéricos en aquel momento.

En el siglo XIX fueron Navier y Stokes los que establecieron las ecuaciones fundamentales que describen un flujo real en fluidos viscosos. De igual manera seguía ocurriendo que, exceptuando unos pocos casos sencillos para los que podían encontrarse soluciones analíticas, la mayor parte de las veces las ecuaciones no pueden resolverse en los casos de interés práctico. En el siguiente punto se explicarán las ecuaciones de Navier-Stokes.

Prandtl desarrolló, a comienzos del siglo XX, la teoría de la capa límite como una simplificación de la solución de Reynolds para las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de la capa límite constituyeron el primer medio de análisis de un flujo no sólo en casos de interés académico, sino en situaciones de interés técnico, con las limitaciones impuestas por los medios existentes en su día.

De todas formas, el concepto de capa límite presenta restricciones que limitan su rango de aplicación. En los casos en que existen fenómenos de turbulencias y separación de capa límite es casi obligatorio utilizar las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes.

La consideración del flujo alrededor de un buque como potencial, permitió a Michell (1898) hace casi un siglo el presentar una solución analítica de la resistencia por formación de olas en un buque fino e iniciar el interés de los científicos en hidrodinámica en los métodos numéricos.

Hacia 1970, con el desarrollo de ordenadores de gran potencia, las técnicas de resolución numérica pudieron ponerse en práctica.

Desde entonces el desarrollo de algoritmos para la solución no estacionaria de las ecuaciones de Navier-Stokes y la solución para un valor medio (RANSE: Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) han avanzado considerablemente. Métodos numéricos como diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos se han utilizado con buenos resultados.

Todo ello ha dado lugar a la aparición de una nueva disciplina en el campo de la Mecánica de Fluidos, la comentada “Dinámica de Fluidos Computarizada” (CFD) que se encuentra en fase de desarrollo permanente.

Con todos ello se establece un campo de investigación “paralelo” al utilizado en los Canales de Ensayo pero mediante modelos matemáticos.

3.3 Campos Hidrodinámicos de los CFD

En la actualidad son diversas las parcelas hidrodinámicas que dan cabida a los cálculos mediante CFD, si bien es cierto que el campo de la aeronáutica fue el pionero en este tipo de cálculos.

La razón de lo anterior la debemos encontrar en el tipo de fluido, aire en lugar de agua, y en la no existencia de la interface aire-agua con la formación de olas que ello conlleva.

La diferencia de fluido hace resaltar la presencia de la viscosidad y de ahí que los aspectos hidrodinámicos que mejor pueden ser abordados por los CFD sean aquellos problemas en donde los efectos viscosos sean pequeños, como pueden ser: la predicción de los movimientos del buque, la componente de la resistencia debida a la formación de olas y la acción del propulsor.

En el campo de la resistencia al avance se han realizado importantes contribuciones en la descripción puramente teórica del flujo alrededor del buque. Sin embargo, el más potente ordenador actual no puede generar una aproximación en donde se tengan en cuenta simultáneamente los efectos de la superficie libre y la viscosidad en toda su extensión.

En los desarrollos de los CFD en este campo de la resistencia se han seguido dos aproximaciones diferentes: aquella que se basa en la teoría potencial, que asume el fluido como no viscoso pero tiene en cuenta la superficie libre y aquella otra que aborda el problema viscoso no considerando la superficie libre.

En el primero de los casos se tienen todas las variantes del conocido método de Dawson (1977) (más adelante se comentará este método) que si bien los valores absolutos que se obtienen deben considerarse con sumo cuidado, sí es extremadamente útil para el diseño de detalles del casco y para comparación entre dos distintas configuraciones.

La descripción numérica del flujo en el caso viscoso presenta más dificultades que el caso potencial con superficie libre, debido a las dificultades de la resolución de la ecuación no lineal de Navier-Stokes.

Tampoco se puede silenciar los trabajos que algunos autores están llevando a cabo para solucionar dicha ecuación en presencia de la superficie libre, siendo la mayor dificultad en estos casos la modelización de la turbulencia.

Por lo que se refiere a las características del propulsor y debido a que con un número reducido de parámetros se puede definir la geometría del mismo, numerosos programas de ordenador, basados en la teoría de las superficies sustentadoras en tres

dimensiones, existen en el mercado y proporcionan una excelente ayuda en el diseño y análisis de los propulsores.

La predicción del comportamiento del buque en la mar puede ser actualmente realizado con suficiente confianza por medios teóricos basándose en la teoría de rebanadas. Debido a que estos cálculos pueden realizarse con un moderado esfuerzo de ordenador son muy útiles en las primeras fases del diseño. También se han desarrollado en los últimos años cálculos tridimensionales de difracción-radiación basados en la teoría potencial.

También el campo de la maniobrabilidad ha sido cultivado por los programas de ordenador, si bien su aplicación es bastante limitada debido a los complejos fenómenos de flujo que aparecen como el flujo cruzado y el desprendimiento de vórtices. En cualquier caso, la mejor aproximación para estudiar el comportamiento de buques por lo que respecta a la maniobrabilidad es a través de simulaciones en el dominio del tiempo.

No obstante este amplio abanico de posibilidades de utilización de los CFD en la hidrodinámica del buque, la utilización más tradicional y la que ocupa el mayor tiempo de los científicos de este campo es la dedicada a la determinación de la resistencia al avance que posibilite la optimización de las formas obteniéndose un buque de mínima resistencia.

3.4 Método de Dawson

El método de los paneles se puede aplicar a cualquier problema de dinámica de fluidos gobernado por la ecuación de Laplace y constituye el flujo más sencillo pero con sentido físico, el flujo potencial de un fluido incompresible y sin viscosidad.

Es un hecho conocido, que se puede formular este problema mediante una ecuación integral lineal extendida a sus contornos, eliminando la necesidad de un mallado tridimensional del dominio estudiado y permitiendo que esta formulación proporcione soluciones del flujo potencial alrededor de configuraciones arbitrarias. Su conformidad con el flujo real, combinado con su generalidad geométrica, ha hecho que los métodos numéricos del cálculo del flujo potencial sean una herramienta importante en muchos campos de la hidrodinámica del buque como se ha comentado anteriormente.

En un principio, los investigadores calificaron a estos métodos como métodos de singularidades de superficie en contraposición a las antiguas aproximaciones de las técnicas de singularidades internas. Sin embargo, la discretización de la superficie del cuerpo considerado en pequeños cuadriláteros condujeron a la denominación de método de paneles y esta acepción ha sido aceptada en la comunidad de la mecánica de fluidos.

Algunas veces, el método se le denomina como método de los elementos de contorno debido a que una aproximación similar se puede usar en otros problemas de la física gobernados por ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales.

El problema de la interacción buque-superficie libre ha sido atacado de forma positiva mediante el método de paneles a pesar de la considerable complicación causada por la presencia de la interface aire-agua.

3.5 Metodología en los CFD

En todos los tipos de programas de CFD se sigue el mismo procedimiento básico.

Durante el pre-proceso:

- Se define la geometría (límites físicos) del problema.
- El volumen ocupado por el fluido se divide en celdas estancas separadas (la malla). La malla puede ser uniforme o no uniforme.
- Se define el moldado físico.
- Se definen las Condiciones de contorno. Este consiste en especificar el comportamiento de fluidos y propiedades en los límites del problema.
- La simulación se ha iniciado y las ecuaciones se resuelven de forma iterativa un estado estable o transitorio.
- Por último, el post-proceso se utiliza para el análisis y la visualización de la solución resultante.

Dentro de la metodología de los CFD se encuentran los métodos de discretización. El primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, es decir en los CFD, consiste en la discretización del dominio para posteriormente calcular sobre la misma la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos, así como las fuentes. Existen muchos métodos de discretización, se puede decir, que

en principio hay tres categorías principales; diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos.

- **Método de diferencias finitas:** El método de las diferencias finitas fue el primer método aplicado para obtener la solución numérica de unas ecuaciones diferenciales. La primera persona en emplearlo fue Euler, probablemente en 1768. Este método emplea el desarrollo en series de Taylor para la discretización de las derivadas de las variables de flujo; por ejemplo, si se quiere calcular la derivada de una función escalar X evaluada en un punto tenemos:

$$X(r + \Delta r) = X(r) + \Delta r \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\Delta r^2}{2} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \dots$$

Con esto, se tiene que la primera derivada X se puede aproximar. Esta aproximación es de primer orden, porque el truncamiento del error es proporcional al término de mayor orden del resto de la serie. Este mismo proceso se puede emplear para obtener aproximaciones más exactas del método de las diferencias finitas, sin más que aproximar con más términos de la serie de Taylor que se obtiene.

Una ventaja importante del método de las diferencias finitas es su simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método sin más que aumentar el orden de aproximación de las derivadas.

Por otro lado, este método requiere una malla estructurada, con lo cual el campo de aplicación se ve reducido a algunos problemas, normalmente con geometrías sencillas. Además, este método no puede aplicarse directamente en coordenadas curvilíneas, teniéndose que transformar las ecuaciones

de Navier-Stokes de curvilíneas a cartesianas para la resolución del problema.

Por este motivo, el método de las diferencias finitas sólo es aplicable en algunas geometrías sencillas.

Hoy en día, se usa este método en la simulación numérica directa de la turbulencia (DNS), pero en muy pocas ocasiones se emplea en aplicaciones industriales.

- **Método de los volúmenes finitos:** El método de los volúmenes finitos emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral. Este método fue utilizado por primera vez por Mc Donald para la simulación de un problema 2-D no viscoso.

Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial. La integral de superficie que aparece en el término de la derecha de la ecuación de Navier-Stokes completa (en su forma integral) es aproximada por la suma de los flujos que atraviesan cada una de las caras del poliedro.

La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de las diferencias finitas.

Comparado con el método de las diferencias finitas, este método es muchísimo más flexible (puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas) ; por este motivo, el método de los volúmenes finitos es el más empleado para la resolución de flujos con geometrías complejas.

El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y la energía. Esto lleva a otra característica importante de este método, que es la obtención de soluciones "débiles" de las ecuaciones. Sin embargo, en este caso, en las ecuaciones de Euler, es necesario añadir una ecuación más, llamada ecuación de la entropía.

Esta ecuación es necesaria porque no existe una única solución "débil".

Es interesante resaltar que bajo unas ciertas condiciones, el método de los volúmenes finitos es equivalente al método de las diferencias finitas. Por todo esto, hoy en día, es el método más popular.

- **Método de los elementos finitos:** El método de los elementos finitos, introducido por Tuner en 1956, se empleó en principio, para el análisis estructural y fue diez años después cuando comenzó su utilización para la resolución de las ecuaciones de campo en medios continuos. Sin embargo, fue a

principios de los 90 cuando el método de los volúmenes finitos adquirió una gran popularidad en la solución de las ecuaciones de Euler y de Navier-Stokes.

El método de los elementos finitos, como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler/Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares (en 2-D) o tetraédricos (en 3-D), generando una malla no estructurada. Dependiendo del tipo de elemento y de la precisión que se quiera, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos. El número total de nodos multiplicado por el número de variables del problema es el número de grados de libertad del problema.

Además, tienen que definirse las llamadas funciones de forma que representan la variación de la solución en el interior de los elementos. En la práctica, se emplean normalmente funciones de forma lineales, que emplean únicamente los nodos pertenecientes a la malla. Las funciones de forma son distribuciones lineales de valor cero fuera del elemento correspondiente a la función. Esto da lugar, a una aproximación de segundo orden en la representación de los resultados.

Este método resulta muy atractivo por el uso de mallas no estructuradas (ampliamente empleadas para la formulación de problemas con geometrías complejas). Además es empleado para el caso particular de fluidos no newtonianos. El método de los elementos finitos tiene una base matemática muy rígida, particularmente en problemas elípticos y parabólicos. Sin embargo, en ciertos casos, el método es matemáticamente equivalente al método de los volúmenes finitos, siendo el esfuerzo matemático mucho mayor. Esto explica porqué el método de los volúmenes finitos se ha hecho tan popular.

Sin embargo, ambos métodos se combinan en ocasiones (normalmente en mallas estructuradas), como por ejemplo para el tratamiento de las condiciones de contorno y la discretización de los flujos viscosos.

3.6 La validación de los CFD

Para asegurar una alta calidad en las soluciones proporcionadas por los CFD se requiere una cuantificación de la incertidumbre de los resultados. Esta incertidumbre se debe tanto a errores en el modelo (incertidumbre en la representación matemática de

la realidad física) como a errores numéricos (incertidumbre en las soluciones numéricas de las ecuaciones matemáticas). En {Pérez Rojas 1996} se resume el objetivo de un análisis de validación en asegurar una alta calidad de las soluciones a través de la estimación de la incertidumbre.

Los errores en el modelo son debidos por ejemplo a los inadecuados modelos de turbulencia en el enfoque viscoso o a las condiciones de contorno. Entre las fuentes de errores numéricos podemos señalar: la transformación del sistema de coordenadas, la discretización, el acoplamiento velocidad-presión, la disipación artificial, los procesos iterativos y de mado no convergentes, aproximaciones geométricas y los redondeos del ordenador.

Los procedimientos para cuantificar estos errores pueden agruparse convenientemente en: documentación, verificación y validación (Dolphin 1997).

- La documentación recoge una detallada presentación de las ecuaciones matemáticas y los métodos numéricos utilizados.
- La verificación es la minimización de los errores numéricos a través de estudios de convergencia y orden de exactitud.
- La validación es la determinación de la verdadera magnitud del error cometido a través de la comparación de los resultados con datos experimentales suficientemente contrastados.

Se requieren estas tres facetas: documentación, verificación y validación, para identificar errores en el modelo y reducirlos a través de una mejora en la representación física del problema o en la representación matemática. No conviene olvidar que la aplicación rigurosa de estos procedimientos permitirá aumentar la confianza en las soluciones proporcionadas por los CFD.

Como se ve, la validación de CFD pasa por la contrastación de los resultados con “bases de datos”, principalmente de carácter experimental pero que también pueden incluir valores obtenidos mediante cálculos numéricos suficientemente contrastados.

A continuación se mencionan los siguientes “datos” susceptibles de utilizarse en la validación de CFD:

- Los correspondientes a la estela nominal, medida con tubos de Pitot de cinco agujeros, en el buque tanque de 200.000 TPM “RYUKO-MARU”. Estos ensayos

también se efectuaron en dos geosims de 30 m. y 7 m. lo cual representa una muy buena fuente de información sobre el efecto de escala.

- El Ensayo de Hamburgo (Hamburgo Test Case) correspondiente a un buque contenedor de 153.7 m. de eslora. Los datos corresponden al buque real y al modelo tanto en canal de ensayos como en túnel de viento.
- Los datos del Programa SUBOFF, realizados por Huang en 1992 sobre cuerpos submarinos con distintos apéndices y que incluye un cuidadoso análisis de errores. Estos ensayos no tienen en cuenta la superficie libre. {Huang 1992}
- Las completas medidas realizadas por el grupo de Toda y Stern en la Universidad de Iowa referentes al buque de la Serie 60.
- Los estudios de Devenport y Simpson sobre el flujo en la unión de cuerpos con apéndices incluyendo el análisis de errores con un margen de confianza del 95%.

En marzo de 1994, se celebró en Tokio un “workshop” sobre CFD, organizado en el mismo espíritu de los celebrados en 1980 y 1990 dedicados, el primero a la capa límite y el segundo al flujo viscoso. El objetivo primario del celebrado en Tokio era el de evaluar el estado del arte en el flujo viscoso con superficie libre, sin embargo también se estudiaron los cálculos de flujo potencial con superficie libre. La validación de los resultados en el caso potencial se realizó con los datos del buque de la Serie 60 de Toda y Stern . Se eligieron dos números de Froude específicos 0.16 y 0.316 de forma que se recogieran los fenómenos de baja velocidad y los correspondientes a un número de Froude alto.

Finalmente se puede decir que de lo contenido en los apartados sobre CFD se pueden indicar las siguientes consideraciones finales:

- La calidad de un programa de ordenador puede evaluarse considerando una serie de características siguiendo las Normas ISO.
- Los CFD es una herramienta en constante desarrollo que ha traspasado su origen en la Academia para instalarse en las Oficinas Técnicas y convertirse en un método muy utilizado en la optimización hidrodinámica del proyecto de un buque.
- La calidad de un programa de CFD queda demostrada a través de una validación con datos principalmente experimentales.

4 Tdyn

En este apartado se hace un resumen de que es el programa Tdyn y los módulos que contiene, y después se explicarán muy brevemente las nociones básicas de utilización del Tdyn. Se explicará esto mediante un ejemplo del análisis de la carena wigley en agua dulce, una carena que se puede encontrar en la web de Tdyn como ejemplo de tutorial. Se explicara los pasos que se han seguido para analizarla y se expondrán los resultados. Más tarde todo esto se aplicara y será ampliado para el problema que se pretende resolver en este proyecto.

Tdyn es un programa de entorno de cálculo de la dinámica de fluidos (CFD), simulación multifísica, y de cálculos de interacción de fluido y estructura, este programa está basado en el método de los elementos finitos estabilizado. Está basado en la solución numérica de fluidos incompresibles o ligeramente compresibles mediante las ecuaciones de Navier-Stokes.

El Tdyn incluye diferentes módulos que permiten resolver problemas de la Transferencia de Calor tanto en sólidos como en fluidos, Turbulencia, Transporte de Especies y problemas de Superficie Libre, (estos últimos interesan a la ingeniería naval sobretodo), usando el mismo método de estabilización mencionado anteriormente. El programa Tdyn también ofrece cálculos estructurales avanzados con modelos de vigas, cables, láminas, membranas y sólidos, que incluyen herramientas de última generación para resolución de problemas de interacción fluido-estructura.

Los diferentes tipos de análisis disponibles en Tdyn se encuentran completamente integrados en el programa, para la definición de la geometría y los datos de entrada, la generación de malla y el post-proceso de los resultados del cálculo. La GiD de Tdyn usa una versátil estructura de datos en forma de árbol, facilitando el control de todo el proceso de introducción de los datos para el análisis.

El programa Tdyn ofrece varios módulos integrados, para una amplia gama de problemas de ingeniería estos módulos son los siguientes:

- **HEATRANS** es capaz de resolver problemas de transmisión de calor por convección (natural o forzada) en fluidos y de conducción en sólidos.

- **RANSOL** utiliza la última tecnología para la resolución del flujo en fluidos reales 3D (transitorios o estacionarios) incluyendo efectos de turbulencia. Los modelos disponibles en Tdyn permiten resolver desde un flujo plenamente compresible a uno incompresible, e incluso problemas de flujo en medio poroso.
- **ADVECT** para la convección-difusión-reacción de diversas sustancias, incluyendo procesos físicos como precipitaciones.
- **FSURF** incluye dos algoritmos avanzados para la resolución de problemas de superficie libre (técnica de Transpiración y el método Overlapping Domain Decomposition Level Set).
- **URSOLVER** para resolver problemas de ecuaciones en derivadas parciales (EDP) definidas por el usuario.
- **ALEMESH** ofrece diversas estrategias de actualización de mallado: prescrita / movimiento libre de cuerpos con actualización automática de malla, movimiento de malla explícito 3D por funciones definidas por el usuario y combinaciones de estas estrategias.
- **RAMSERIES** es un entorno avanzado para el análisis estructural, basado en el método de los elementos finitos. El módulo incluye herramientas avanzadas para el cálculo de interacción fluido-estructura.
- **SEAKEEPING** es una herramienta avanzada para el análisis de problemas de comportamiento en la mar.

A continuación se muestran algunas de las aplicaciones del Tdyn:

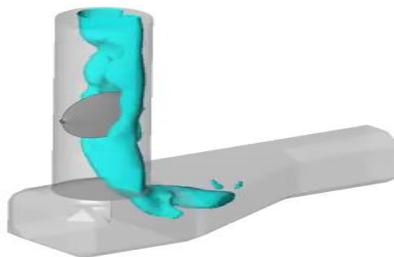


Ilustración 6: Circuito de refrigeración para una central nuclear

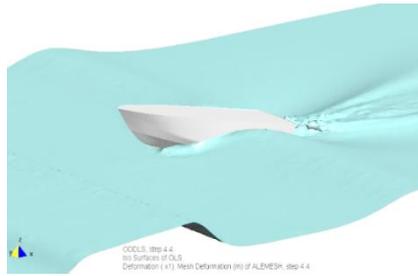


Ilustración 7: Análisis en olas de una embarcación de semi-plano I

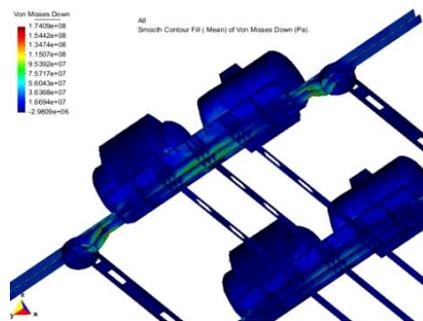


Ilustración 8: Estructura semi-sumergible para producir energía de olas

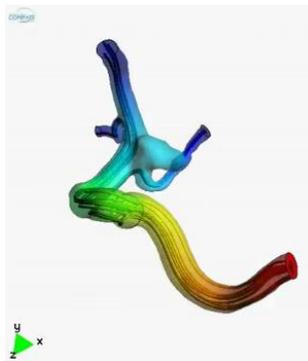


Ilustración 9: Análisis del flujo de sangre sobre un aneurisma cerebral real

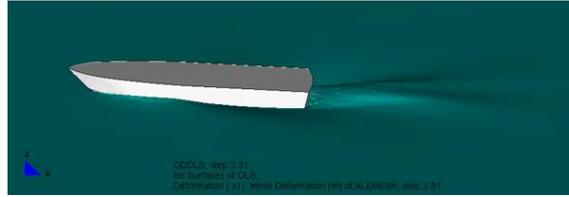


Ilustración 10: Simulación del remolque una embarcación en aguas tranquilas

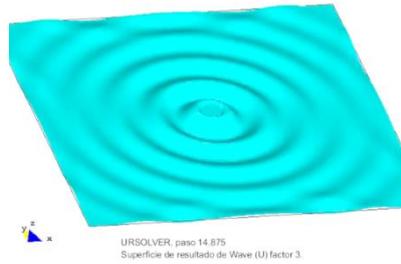


Ilustración 11: Propagación de ondas de gravedad

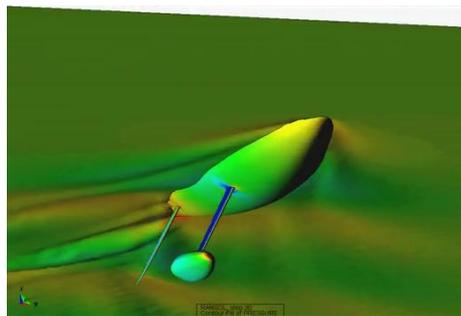


Ilustración 12: Análisis hidrodinámico de un yate de la Copa América

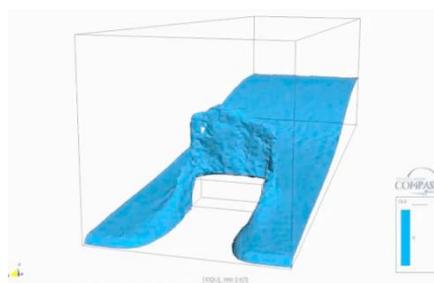


Ilustración 13: Experimento sobre el impacto del agua en cubiertas de barcos

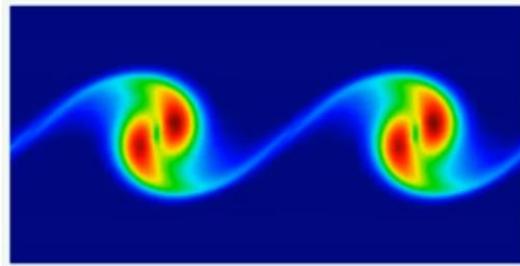


Ilustración 14: Vorticidad - Capa de mezcla

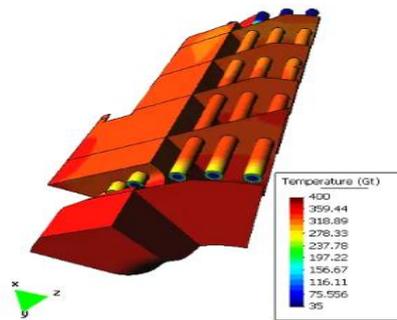


Ilustración 15: Simulación del enfriamiento de un molde de un envase de vidrio



Ilustración 16: Análisis termo-mecánico de un envase de vidrio

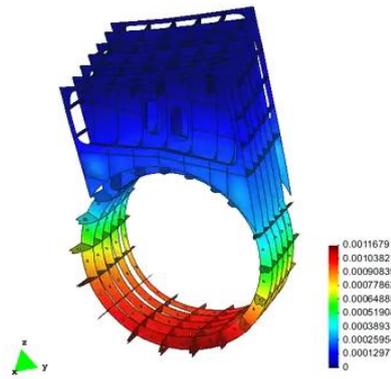


Ilustración 17: Acoplamiento fluido-estructura (FSI) de un conducto de un hélice

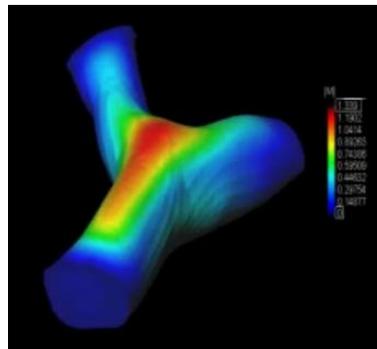


Ilustración 18: Flujo de sangre en la bifurcación de la carótida



Ilustración 19: Análisis del impacto del agua en un tanque 2D

5 Ejemplo del casco Wigley en agua dulce

5.1 Introducción

Ahora como se ha mencionado anteriormente, se explicaran brevemente algunas de las nociones básicas de la utilización del Tdyn que se necesitan para realizar este proyecto, mediante el análisis del ejemplo del tutorial, la carena Wigley en agua dulce.

Este ejemplo muestra los pasos necesarios para el análisis de la carena Wigley, con un número de Froude($Fr = 0,316$). Este ejemplo corresponde al caso de un fluido no viscoso y en donde se ha tenido en cuenta la simetría de la geometría de la carena para poder realizar la simulación más fácilmente.

El casco Wigley es un modelo estándar para la validación experimental y los datos numéricos. La geometría de este modelo se puede ver en la siguiente imagen.

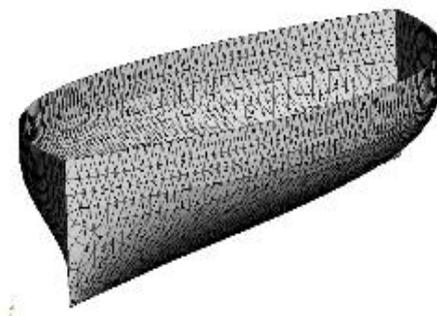


Ilustración 20: Casco Wigley

El casco Wigley se ha creado utilizando la siguiente ecuación:

$$y = \frac{B}{2} \left(1 - \left(\frac{2 * x}{L} \right)^2 \right) * \left(1 - \left(\frac{z}{D} \right)^2 \right)$$

Donde L es la eslora, B la manga y D es el calado.

Para este ejemplo los parámetros que se han usado son los siguientes:

$L = 6\text{m}$

$B = 0.6\text{m}$

$D = 0.375\text{m}$

Velocidad (V) = 2.424 m/s

Número de Reynolds = $1.5 \cdot 10^7$

Densidad (ρ) = 1025 kg/m³

Viscosidad (μ) = $1.0 \cdot 10^{-3}$

5.2 PRE PROCESO

El primer paso para cualquier análisis es la creación del problema. Esto incluye la creación o importación de un archivo CAD que será la geometría del problema (es decir, el volumen de control a analizar) la asignación de los límites y las condiciones iniciales, y la generación de la malla.

Observaciones: Una descripción completa de las capacidades del pre-proceso CAD del programa se puede encontrar en la referencia de GiD y manuales de usuario (ver sección de post-proceso).

Cuando hay un nuevo análisis para el cálculo, se ha de seleccionar el tipo de simulación específica y la dimensión de simulación correspondiente. Esto se puede hacer en cualquier momento de la creación del nuevo proyecto para la definición final de la geometría, sino ha de llevarse a cabo antes de que el usuario pueda proceder a la asignación de las condiciones de contorno y otros parámetros del problema.

Observaciones: El tipo de análisis puede ser cargado desde la ventana de Stuart Data mencionada anteriormente, y todas las preferencias se pueden gestionar desde el árbol principal del programa.

Una vez elegido el tipo de simulación y las opciones que pretende calcular se pasará a elegir:

- Gravedad: Se elige la dirección de la gravedad. Este vector indica la dirección, pero no la magnitud de la gravedad.
- Unidades: Se seleccionan las unidades de la geometría.

Una vez elegido todo lo mencionado se seguirán los siguientes pasos:

- Asignación de Condiciones y límites.
- Definición de materiales.
- Datos del problema general de la inserción.
- Definición de datos a resolver.
- Unidades de definición.
- Asignación de tamaño de malla.
- Generación de malla.

5.3 Start Data

Para este tipo de problema se debe empezar por abrir la ventana de Start Data, (en el menú seleccionamos Data—Start Data) en esta ventana se puede seleccionar el tipo de problema que se pretende analizar cómo se ha dicho anteriormente. En este caso se seleccionará:

- 3D
- Fluid Flow
- Transpiration

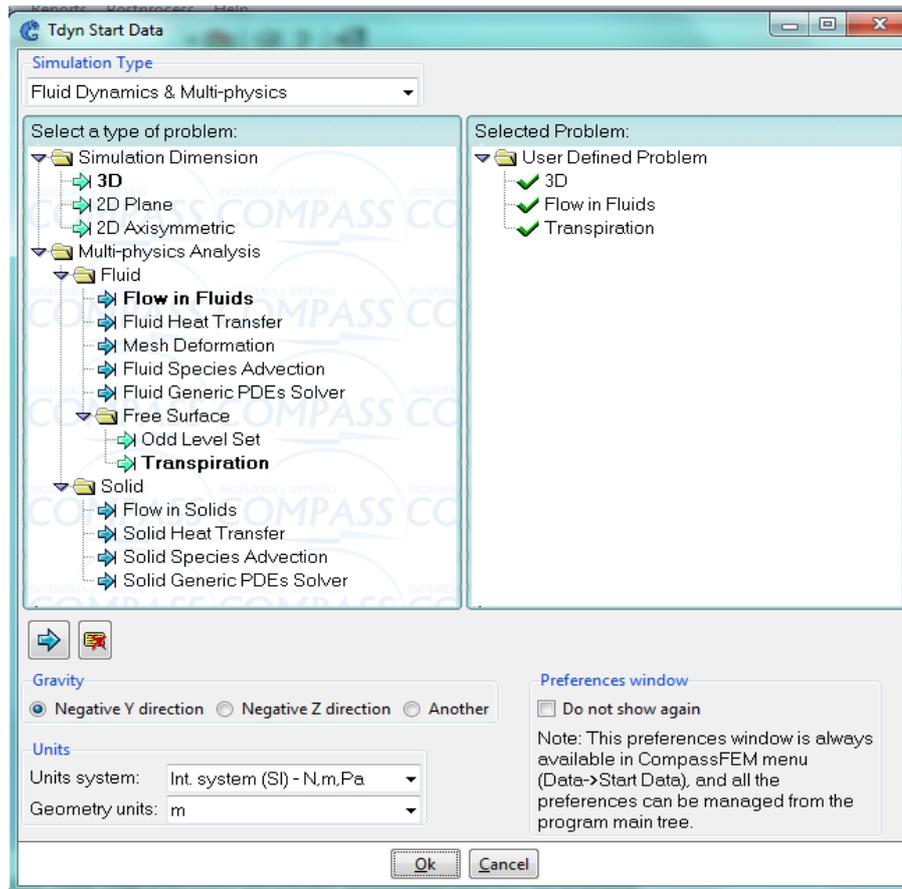


Ilustración 21: Menú Start Data del Tdyn

5.4 Creación de la geometría y el volumen de control

El siguiente paso será la creación de la geometría. En este caso la carena Wigley se puede obtener mediante una descarga desde la web de Tdyn, por lo tanto la creación de la geometría no se tendrá que hacer. Hay que decir que cuando se habrá el archivo Wigley solo aparecerá la mitad de la carena ya que la carena es simétrica. Esto es así para simplificar los cálculos del programa, será más rápido y más fácil analizar una mitad que la carena completa. Para la geometría de este caso se han generado superficies NURBS.

Si no se tuviera la geometría, en el tutorial 1 del Tdyn se puede encontrar como generar una geometría.

Por lo tanto, ahora, el siguiente paso será la creación del volumen de control para el análisis de la carena Wigley.

La creación del volumen de control dependerá de la longitud de la geometría a analizar, en este caso como se trata de un buque dependerá de su eslora.

Primero se identificarán los 2 puntos extremos de la línea de flotación, estos puntos serán el punto de popa y el de proa y su distancia definirá la eslora en la flotación del buque. Una vez definidos estos puntos, se definirá los demás puntos.

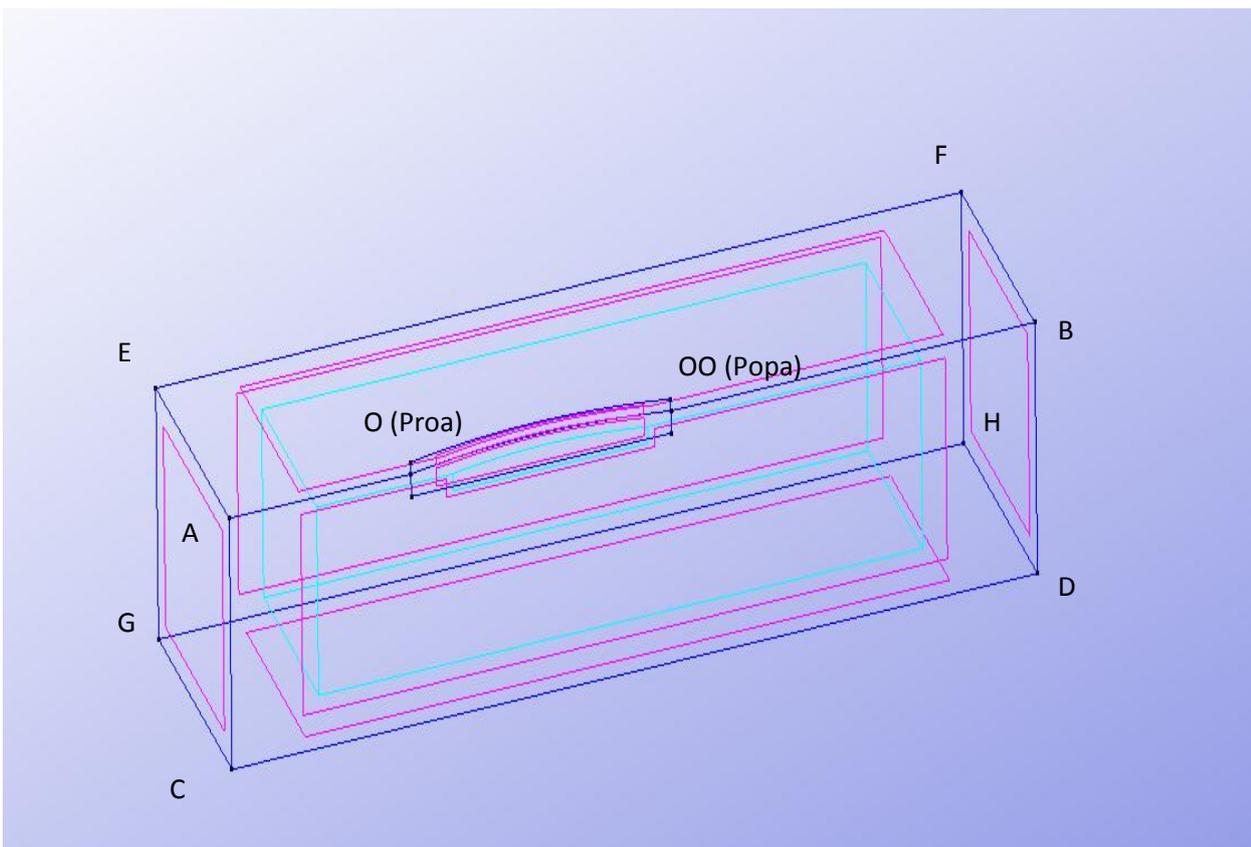


Ilustración 22: Volumen de control del ejemplo Wigley

Teniendo en cuenta que el punto de proa está en el punto $(0,0,0)$ y que se va a llamar O, el punto A estará a una distancia de un 70% de la eslora desde O y hacia proa en la dirección del eje x. El punto B estará a una distancia de un 140% de la eslora desde O y hacia popa en la dirección del eje X. El punto C estará a una distancia de un 80% de la eslora desde A y hacia abajo en la dirección del eje Y. El punto D será igual pero desde el punto B. Finalmente, los puntos E, F, G y H estarán a una distancia de un 70% de la eslora desde los puntos A, B, C y D respectivamente y hacia la dirección negativa del eje Z.

Para crear los puntos, se seleccionara en el menú “Geometry”—“Create” y ahí se puede escoger lo que se desea crear, puntos, líneas, superficies, volúmenes, etc.

Una vez asignados los puntos el siguiente paso es unir estos mediante líneas. Para ello se unirán los puntos A-B-C-D, E-F-G-H, A-E, B-F, C-G y D-H. Finalmente el punto A deberá unirse al punto O de proa y el punto D al punto OO de popa.

Una vez unidos todos los puntos el siguiente paso es la definición de la superficies, para ello se elegirá en el menú: “Geometry— Create --- NURBS surface --- By contour”. Se crearan las 6 superficies necesarias para luego crear el volumen de control igual pero en vez de seleccionar NURBS surface, se elegirá “Volume” y una de las 2 opciones que hay “By Contour” o “Automatic 6 sides volumen”. Si el programa marcara un error, esto podría estar causado por una doble línea en algún lugar una mala definición de superficie o algún punto colocado en un mal lugar. La vista final de todo se puede ver en la figura anterior.

5.5 Tdyn Data

El siguiente paso será definir todos los datos necesarios para el cálculo del problema. En el menú se seleccionara “Data--- Internal Data” y aparecerá el siguiente menú:

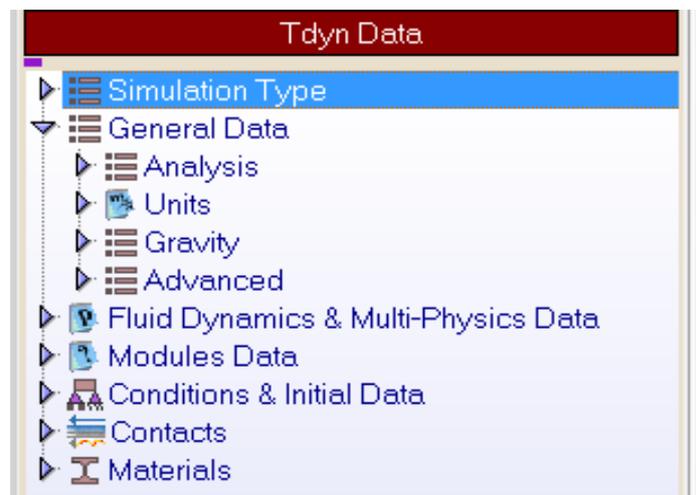


Ilustración 23: Menú interno (Tdyn Data)

Se irá siguiendo el menú de la imagen para poner los cálculos. De los primeros apartados, Simulation Type y General Data no se tocara nada ya que es lo mismo que se ha definido en el Start Data.

Observaciones: Puede que el programa de un error en cuanto a la gravedad, esto será porque no se ha definido bien, se tiene que ver como se tienen dispuestos los ejes y dependiendo de esto elegir la dirección de la gravedad, ya que el modulo es 9.80665.

A continuación se seguirá por el apartado Fluid Dynamics & Multi-Physics Data donde se divide en varios apartados los cuales se podra ver en la imagen.

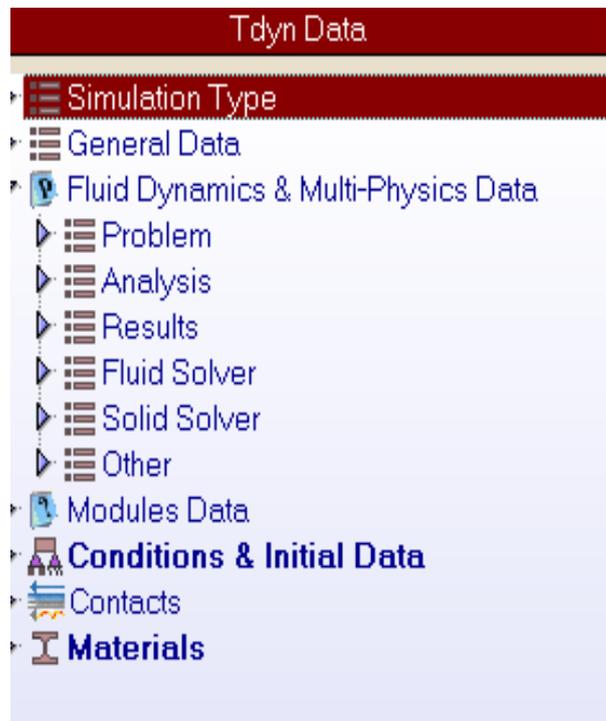


Ilustración 24: Apartado Fluid Dynamics & Multi-Physics del menú Data

Observaciones: En este apartado, en “Analysis” es donde se suelen dar la mayoría de los errores del programa.

En la parte de “Problem”, que se divide en “Solve Fluid” y “Solve Solid” en principio no se debe tocar nada debe quedar como se ve en la siguiente imagen y como solo se trabaja con fluidos la parte de “Solve Solid” no se tocará.

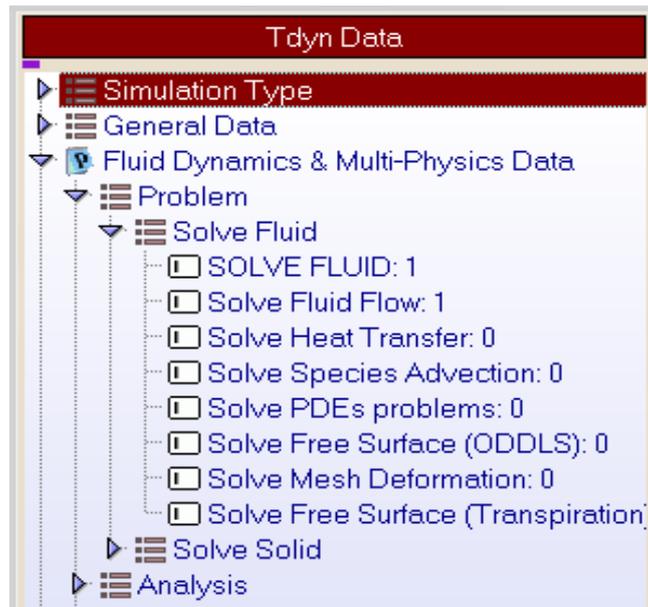


Ilustración 25: Apartado de Solve Fluid en el menú Data

La parte de Analysis es más complicada. En el siguiente dibujo se puede ver los diferentes datos que se pide.

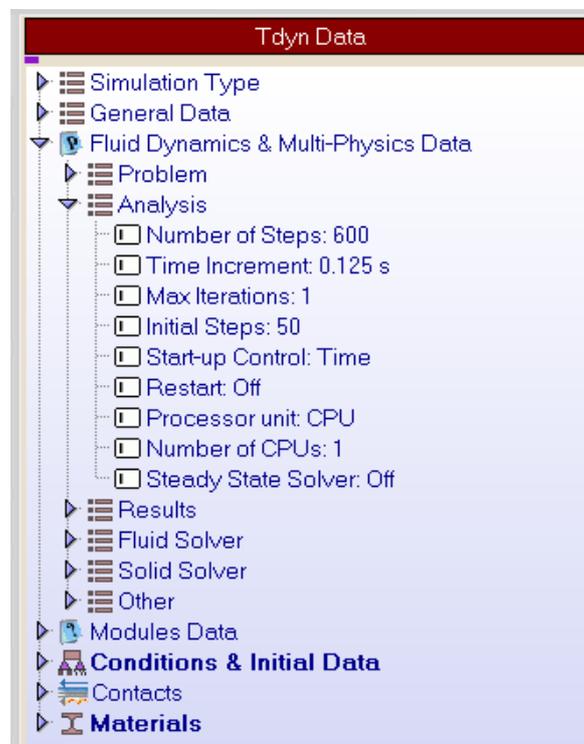


Ilustración 26: Apartado de Analysis en el menú Data

Para poner el dato de “Number of Steps” se debe ir a la ayuda del Tdyn a la parte de Analysis y calcularlo mediante la fórmula que aparece ahí.

$$N^{\circ} \text{ of Steps} \geq 1000 \cdot dt \cdot V/L$$

$$dt = C \cdot L_D / V$$

Donde:

- dt = incremento de tiempo
- V = Velocidad del modelo
- L_D = Eslora
- C = Constante ($0,1 < C < 0,01$)

Para este caso elijo un $C=0.05$, por tanto:

$$dt = 0,125$$

$$N^{\circ} \text{ Steps} = 600$$

Para “Max. Iterations” se pondrán 1, pero se puede poner hasta 10 y para “Initial Steps” basta con calcular más o menos el 10% de N° of Steps. Por lo que Initial Steps se pondrán 50. Finalmente los otros apartados de Analysis se podrán dejar como se puede ver en la imagen.

La parte de “Results” no es muy importante de cara a los resultados, tiene que ver con el tamaño del fichero de resultados, por lo tanto no lo se tocará.

En cuanto a la parte de “Fluid Solver”, está relacionada con la información requerida para que el programa pueda hacer correctamente la integración y resolver el problema. Lo más destacable a tener en cuenta es que “Time Integration” este en Backward Euler, “Solver NonSymm” este en “Bi Conjugate Gradient” y que “Solver Symm” este en “Bi Conjugate Gradient” de entre todas las opciones que se tiene.

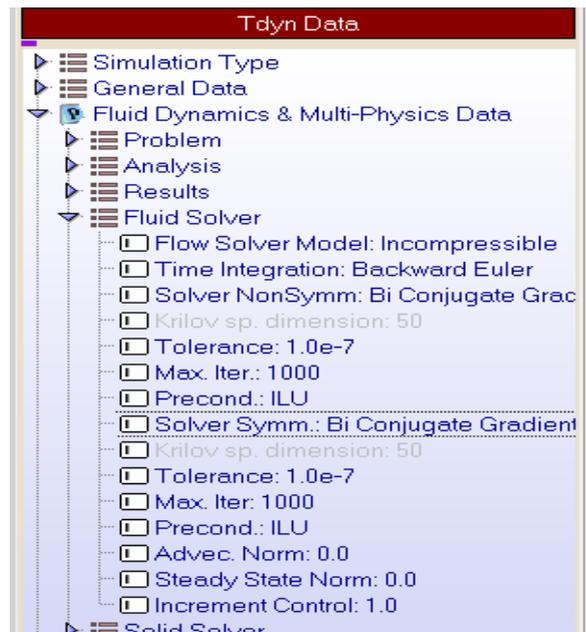


Ilustración 27: Apartado de Fluid Solver en menú Data

Finalmente en la parte de “Fluid Solver” no hace falta cambiar ningún dato más al igual que en “Solid Solver” ni en “Others”.

La siguiente parte es “Modules Data”, la que se refiere a toda la información específica necesaria para el desempeño de un análisis particular. Este apartado para este problema se divide en “Fluid Flow” y “Free Surface” como se puede observar en la imagen.

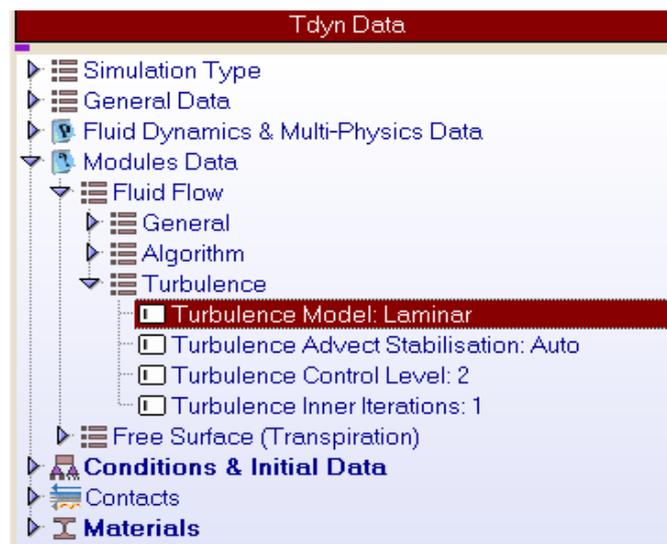


Ilustración 28: Apartado de Tubulence en menú Data

Aquí no se debe tener mayores problemas para resolverlo, en “General” se despliega el menú y aparecerá la opción “Operating Pressure” en la que se ha considerado la presión atmosférica, es decir, 101325 Pa. En la opción que aparece también en este menú de “ X Plane Symmetry in Fluid” se debe poner 1, ya que como se ha dicho anteriormente se ha considerado la mitad del volumen de control ya que es simétrico para simplificar y facilitar los cálculos.

Por lo que respecta a las otras opciones de este menú y el de “Algorithm” se puede dejar sin modificar, pero no el de “Turbulence” el cual se debe modificar ya que se ha considerado para este problema flujo turbulento, para el que se elegirá “K.E.two layers” y esto se debe modificar en la opción de “Tubulence Model” como se puede apreciar en la figura.

Del apartado de “Modules Data” solo queda la opción de “Free Surface (Transpiration)” que da la opción de “Wave Elevation Norm”; que es una norma euclidiana del campo de ondas de elevación utilizada para comprobar la convergencia en el bucle de iteración no-lineal.

El siguiente apartado es el de las condiciones y datos iniciales, las condiciones son todas las propiedades de un problema (con excepción de los materiales) que se pueden asignar a una entidad, con el fin de definir las condiciones de contorno básico de un problema. Las condiciones deben ser utilizadas para definir las condiciones de entrada y salida de frontera.

En Tdyn las condiciones están disponibles en el menú de “Cond. & Initial Data”.

Si una malla ya se ha generado, cualquier cambio en las asignaciones de las condiciones, requiere de un nuevo mallado para la transferencia de estas nuevas condiciones de la malla. Si las condiciones han cambiado y no se generara una nueva malla, el programa advertirá al usuario.

En el menú “Conditions and Initial Data” se pueden distinguir tres apartados:

- “Conditional and Initial Data”
- “Fluid Flow”
- “Free Surface (Transpiration)”

En la parte de “Conditional and Initial Data” solo se modificara, como se puede ver en la imagen, la velocidad que para este problema es de 2.424 m/s. Se debe tener en cuenta la dirección del fluido en la que se requiere que analice el programa. Para este

caso se ha elegido la dirección del eje X y como ya se ha mencionado una velocidad del fluido de 2.424 m/s.

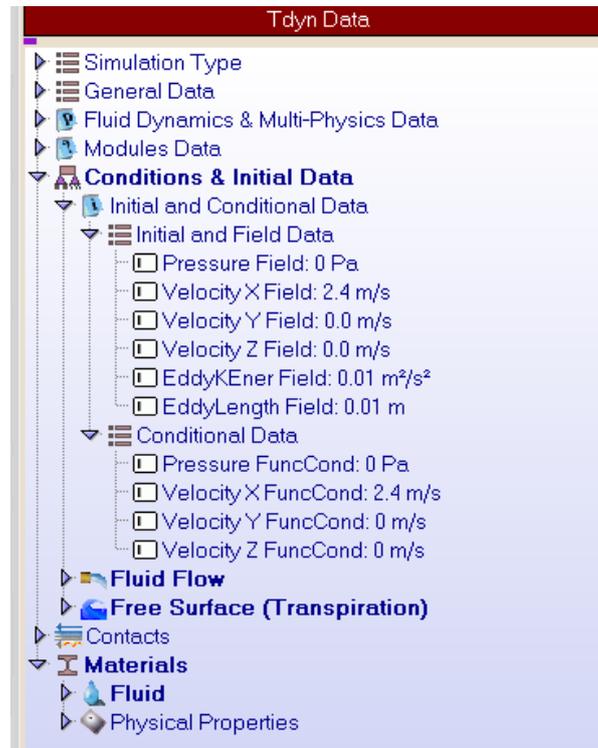


Ilustración 29: Apartado de Initial and Conditional Data en el menú Data

La opción de “Fluid Flow” está relacionada con el análisis de la frontera del volumen de control y es muy importante para la correcta ejecución del problema.

La primera opción de este menú es la de “ Wall/Bodies”, los límites permiten al usuario definir las condiciones especiales de frontera, en representación de las paredes físicas o entidades. Las opciones disponibles incluyen la Ley de análisis de la pared, así como las propiedades de movimiento del cuerpo. Estas propiedades pueden ser asignadas a las líneas (plano 2D o simetría axial 2D), superficies (3D) o mallas de frontera.

Para este caso opción de Wall/Bodies debe quedar como la muestra la imagen.

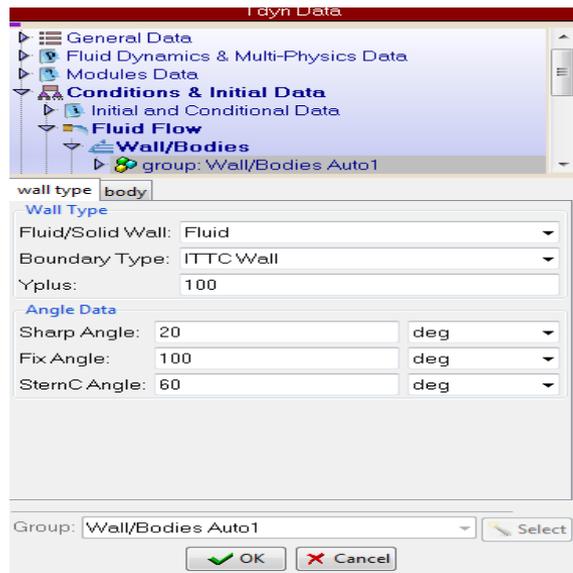


Ilustración 30: Menú de Wall/Bodies

Una vez puestos los datos se debe seleccionar el botón “Select” y elegir solo la superficie del casco en el programa. Una vez seleccionada la superficie del casco se elige OK y ya se tendrá asignado el cuerpo que se pretende analizar.

Para entender esta parte mejor se explicara mediante la imagen.

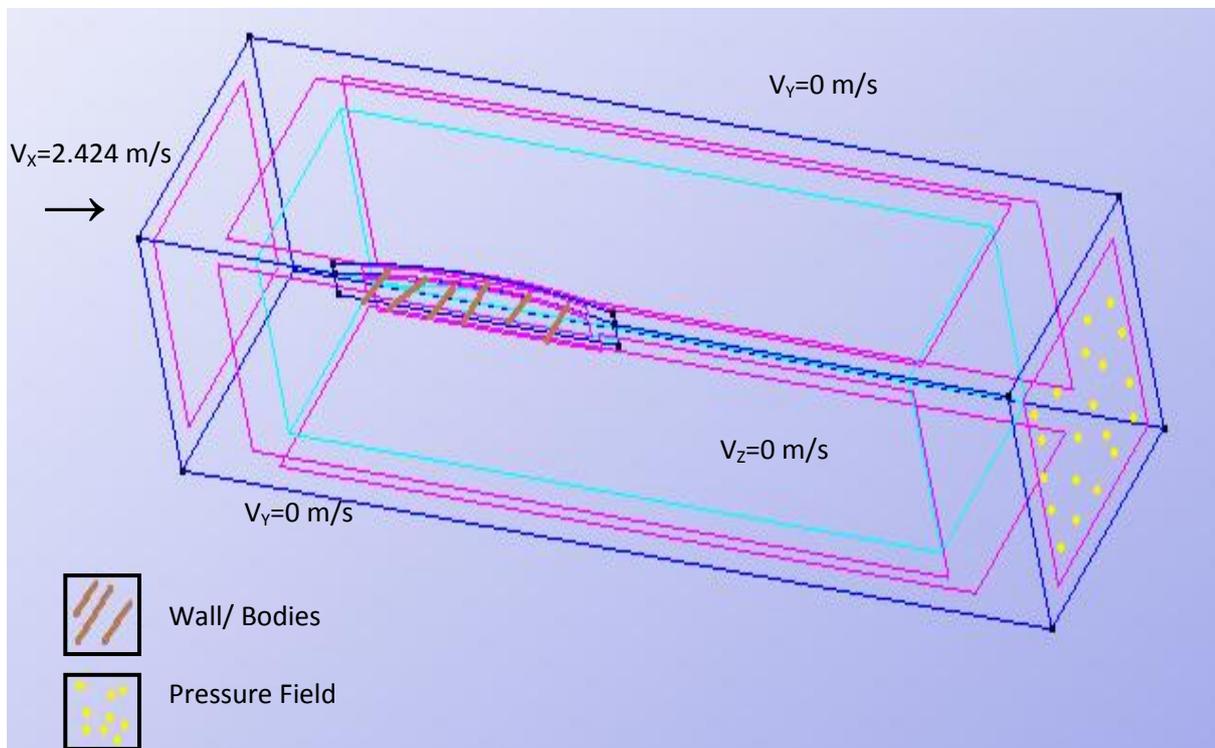


Ilustración 31: Dibujo que muestra las condiciones de contorno de las superficies

El siguiente paso será asignar el campo de presiones a la superficie deseada, en este caso como se puede observar en el dibujo la superficie marcada con puntos amarillos será el “Pressure Field”. Para ello se seleccionara esta opción y aparecerá una ventana como la de la imagen.

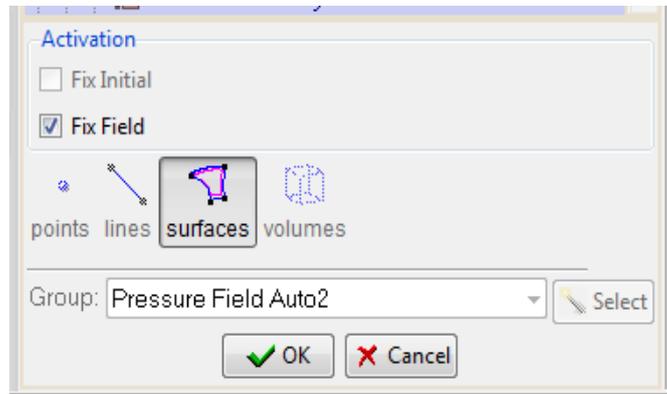


Ilustración 32: Menú de Pressure Field

Se debe seleccionar “Fix Field” y “Surfaces”, luego “Select” y elegir la superficie que se ha dicho como Pressure Field. Una vez hecho esto, se aceptará y ya se tendrá fijado el campo de presiones.

Hecho todo esto solo queda fijar el campo de velocidades en la opción Velocity Field. Como se puede apreciar en el dibujo la velocidad en la dirección Z e Y es cero y en la dirección X es 2.424 m/s por tanto se fijara uno por uno en tres ventanas diferentes. Las ventanas para el campo de velocidades son como la que se muestra en la figura.

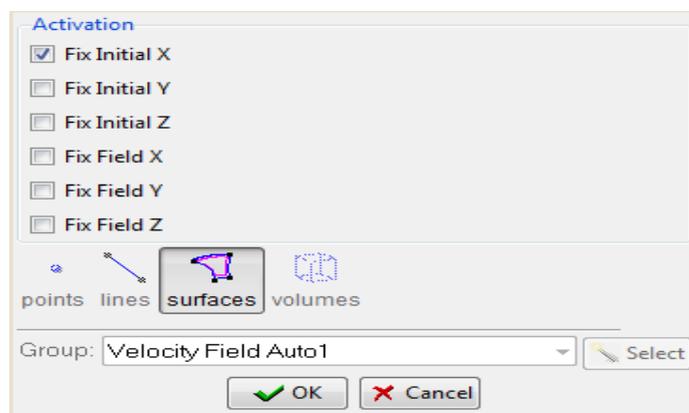


Ilustración 33: Menú de Velocity Field

El procedimiento es el mismo pero se debe tener en cuenta que para cada dirección se debe seleccionar en la opción Fix Initial la dirección correspondiente, es decir, para la dirección X se elegirá Fix Initial X y así respectivamente. Una vez hecho esto se acepta y se tendrá definido el campo de velocidades.

Solo quedara por definir la superficie libre y esto se puede hacer la opción “Free Surface (Transpiration)”. En esta opción la parte de “Fix Beta” no es importante así que se elegirá la opción “Free Surface”, que será hacer prácticamente el mismo procedimiento que anteriormente. Al elegir esta opción aparecerá una ventana como la de la imagen.

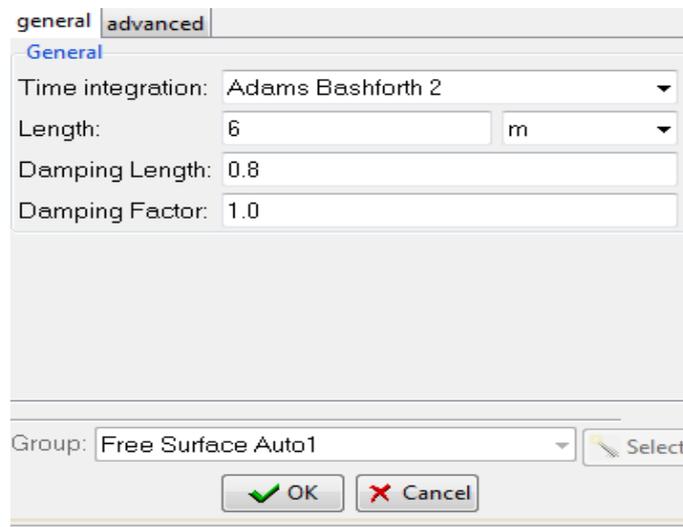


Ilustración 34: Menú de Free Surface

Una vez aquí se elegirá el tiempo de integración de “Adams Bashforth 2”, la longitud será la del casco “Wigley” y las ventanas de “Damping” no se modificaran. Una vez elegido esto se hará como anteriormente, se seleccionara la superficie que se considere como superficie libre y se aceptara.

Por último como se ha seleccionado turbulencia en “Fix Turbulence” se seleccionara “Surface” y se seleccionara el casco.

Con todo lo explicado se ha podido definir las fronteras y los cuerpos para el análisis del problema, el siguiente y el último paso antes de generar la malla será el de definir el fluido. Para ello en la opción de “Materials” se seleccionara Fluid y aparecerá la siguiente ventana que muestra la figura.

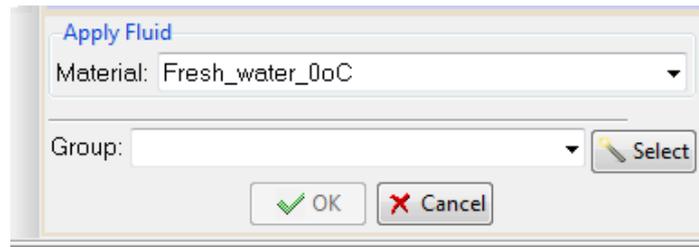


Ilustración 35: Menú selección de material.

En esta ventana se puede seleccionar el tipo de material que se desea que atraviese el volumen de control. En este caso se elegirá agua dulce a 0°C y en “Select” se elegirá el volumen de control.

Una vez hecho esto ya se ha terminado de poner todos los datos y condiciones para el análisis del problema y se pasara a hacer la creación del mallado para el análisis.

5.6 Generación de malla

El siguiente paso será la creación de la malla. La generación de una malla es el proceso por el cual se calcula una malla de elementos finitos de la definición de la geometría. Esta malla se utilizará para el análisis de elementos finitos en una etapa posterior. Las condiciones y los materiales asignados a las entidades geométricas serán transferidos a los nodos y los elementos de la nueva malla.

La generación no depende de si las capas están encendidas o apagadas en el momento de generación, pero se puede seleccionar la opción “No Mesh Frozen Layers” y el programa no mallara las capas que estén ocultas. Cada nodo y elemento será asignado a la capa en la que se definió la entidad geométrica original.

Los valores predeterminados son:

- Una entidad es de la malla, si no pertenece a una entidad de nivel superior.
- Una línea de la malla se compone de dos nodos y una superficie mallada se compone de una estructura de elementos triangulares. El valor predeterminado para mallas estructuradas son elementos cuadriláteros. Y las mallas no estructuradas de volumen se compone de elementos tetraédricos, y por último las mallas de volumen se compone de hexaedros.

También hay que comentar que todos estos elementos utilizan una interpolación lineal para calcular las variables desconocidas.

Finalmente, para la creación de la malla se irá al menú “Mesh”, al desplegar este menú se elegirá la opción “Unstructured”. En “Unstructured” se puede elegir varias opciones como se puede observar en la imagen.

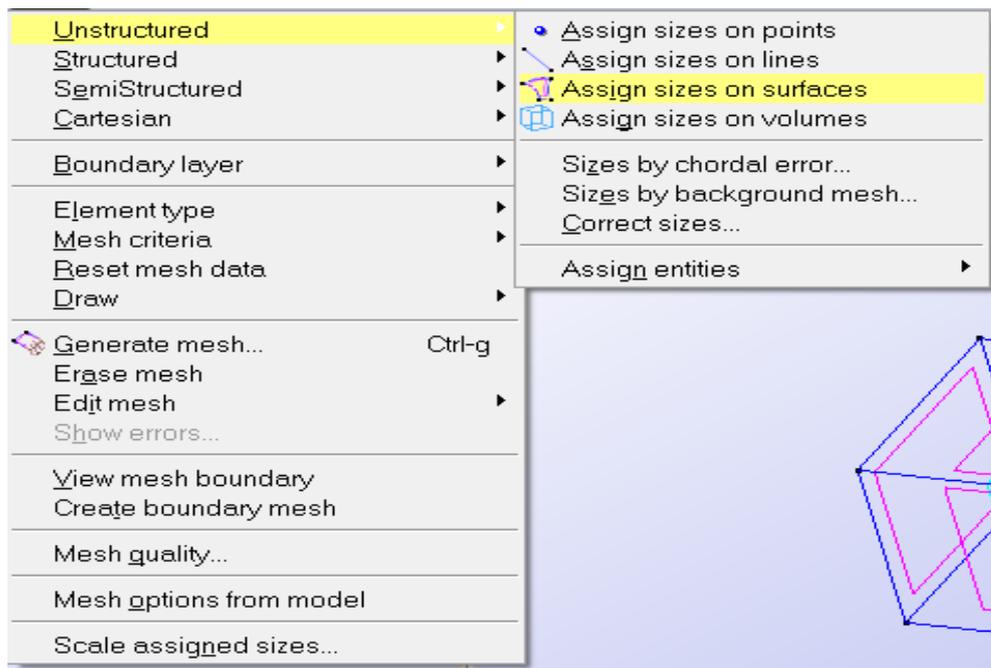


Ilustración 36: Menú de generación de malla

Se elige la opción “Assign sizes on surfaces” para asignar el tamaño del mallado para el casco y la superficie libre y “Assign sizes on volumes” para el resto del volumen. El tamaño que se asigna es el máximo tamaño del diámetro de uno de los tetraedros que componen la malla.

Para el casco se pondrá un tamaño de 0.05 m, para la superficie libre de 0.1 m y para el volumen de 0.5 m. En la imagen se puede observar la ventana para asignar el tamaño de malla.

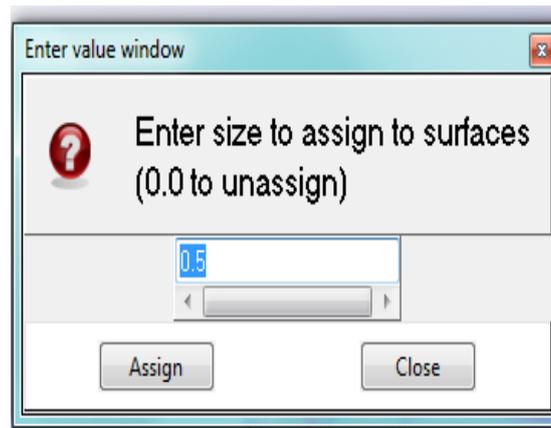


Ilustración 37: Valor del tamaño de la malla en una superficie

Una vez asignado el tamaño de la malla se puede generar la malla si se va al menú “Mesh → Generate Mesh”.

Una vez se entre en “Generate Mesh”, saldrá una ventana que se puede ver en la imagen . En esta ventana se pondrá como máximo tamaño de elemento de 1 y en “Unstructured size transition” se elegirá 0.4.

Una vez hecho esto empezara el programa a generar la malla y aparecerá una ventana como la de la figura .

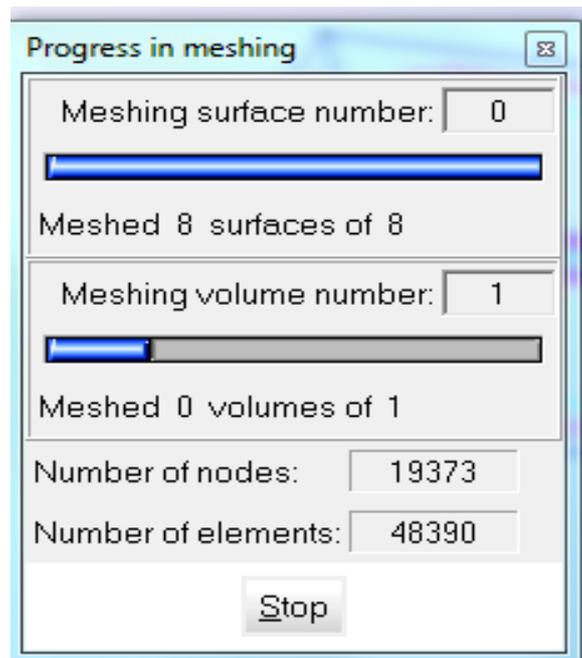


Ilustración 38: Progreso de la generación de malla

Cuando el programa termine de calcular la malla quedara como se puede ver en la figura. Cuanto más tupida sea la malla más le costará al programa de calcular la malla.

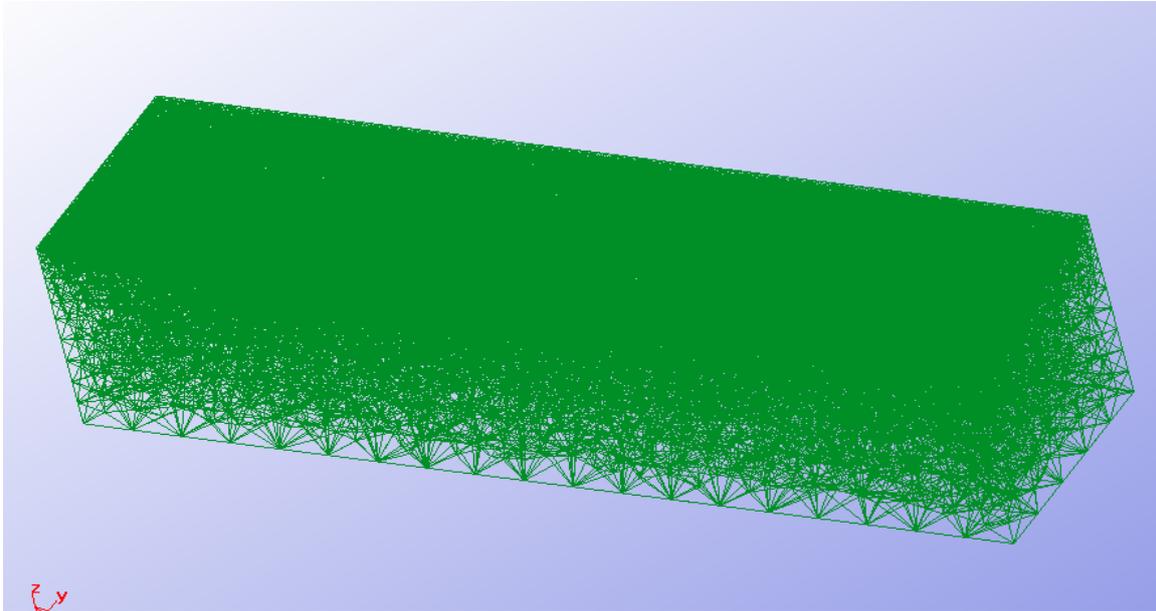


Ilustración 39: Malla generada

La malla calculada es una malla lo suficientemente tupida ya que consta de 186000 elementos tetraédricos. Esto se puede observar en una ventana que saldrá cuando el Tdyn termine de generar la malla. Esta ventana se puede observar en la imagen.

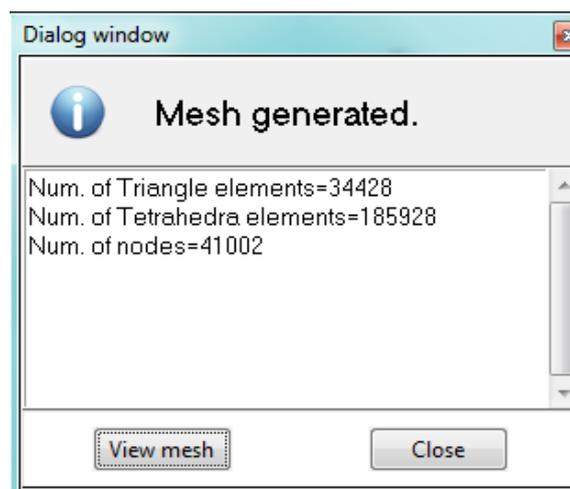


Ilustración 40: Ventana de dialogo de la malla generada

5.7 Cálculo

Una vez generada la malla el siguiente paso será el cálculo. Se empezará por pulsar en el menú la ventana de “Calculate, → Calculate”. También se puede abrir en la opción de “Calculate Window”, una ventana donde se puede seguir el proceso de cálculo si se abre la opción de Output View.

Estas ventanas se pueden observar en la figura.

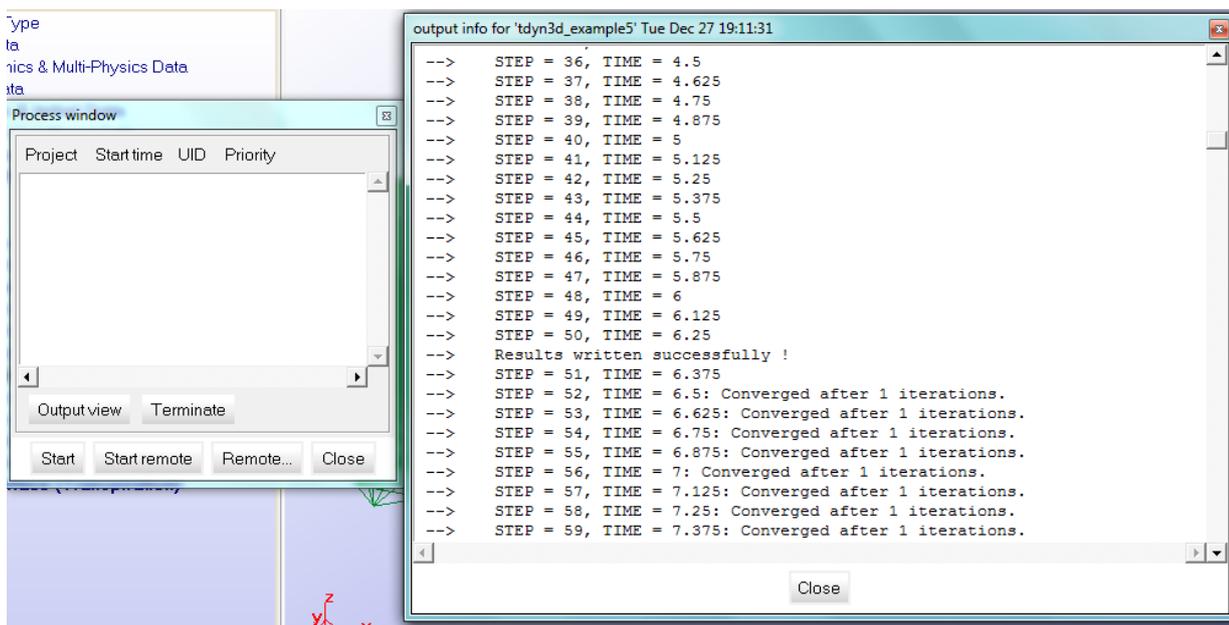


Ilustración 41: Ventana del proceso de cálculo

Una vez que el programa este calculando se debe esperar a que este termine. El proceso de cálculo será más largo y costoso cuanto más tupida sea la malla y más nodos tenga esta.

Como se puede observar en la imagen las iteraciones convergen, esto significa que el programa está calculando correctamente y que el camino seguido es el correcto.

En esta ventana se podrían observar los posibles errores que se tuvieran y saber donde están para corregirlos. Cuando el proceso de cálculo ha terminado, el sistema muestra el siguiente mensaje:

Process '...' started on ... has finished.

Una vez hecho el cálculo el siguiente paso sería visualizar los resultados en el post-proceso.

5.8 Post-proceso

Los resultados obtenidos del proceso de cálculo pueden ser analizados en el modo post-proceso.

Hay comentar que los resultados intermedios pueden mostrarse en cualquier momento del proceso, incluso si los cálculos no están terminados.

Sin embargo, en el caso de las simulaciones grandes que requieren mucho tiempo de computación y memoria RAM, es aconsejable salir del módulo PREPOST mientras el proceso está en marcha.

Es posible cerrar el programa mientras se tiene un proceso en curso (antes de cerrar, saldrá una ventana de advertencia que preguntará si se quiere acabar el proceso), a esto se debe responder negativamente.

Los resultados que se pueden observar dentro del post-proceso, básicamente son las presiones y las velocidades. Pueden visualizarse usando opciones como girar el elemento, usar rellenos de contorno, curvas de nivel, iso-superficies, gráficos, etc.

Cuando el análisis se ha completado el proceso, se puede proceder a visualizar los resultados pulsando como ya se ha dicho anteriormente Postproceso. Se puede encontrar representado por un icono como muestra la imagen.



Ilustración 42: Icono post-proceso

En la actualidad existen dos interfaces diferentes para el post-proceso gráfico para ser utilizados en el Tdyn. Por un lado, se puede abrir el post-proceso tradicional al seleccionar el "Post-proceso → Post-proceso tradicional " en el menú. Cabe destacar que se puede encontrar ayuda sobre el post-proceso en el menú ayuda del programa. Por otro lado, ahora es posible utilizar una interfaz gráfica de post-proceso perfectamente integrado en un panel con forma de árbol compacto, lo que añade

funciones adicionales a las tradicionales del post-proceso. Por lo tanto, este post-proceso puede procesar todas las características de un panel, lo que hace fácil su manejo.

La interfaz gráfica de post-proceso se encuentra por defecto en el lado izquierdo de la pantalla del programa.

Una vez dentro del post-proceso existen algunas características de visualización y opciones de gestión de la sección de pre-proceso: Zoom, Rotar (Girar pantalla / objeto ejes, Girar rueda de desplazamiento, etc.), volver a dibujar, renderizar, etiquetar, seleccionar capas, etc.

Observaciones: Se debe destacar que es necesario elegir el archivo de resultados "Binary2" en las preferencias de formato de árbol de datos para ser capaz de leer los resultados con éxito en el post-proceso ya que el archivo " Binary1 "se utiliza para el formato del post-proceso tradicional.

El menú contextual del post-proceso se puede ver en la imagen.

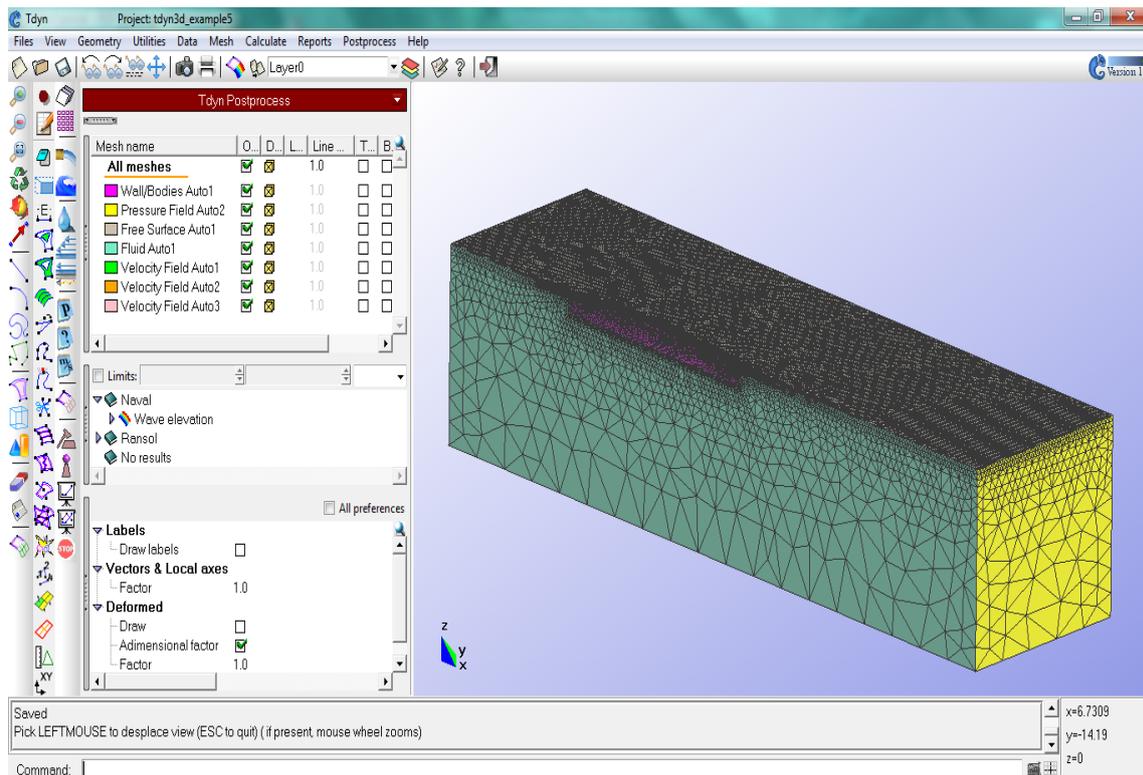


Ilustración 43: Imagen del post-proceso

Una vez se llegue al post-proceso, La ventana principal de post-proceso tiene varios conjuntos de opciones, como el control de las animaciones, las mallas, los resultados o los selectores de las preferencias. De esta manera, cada conjunto de estas opciones se pueden abrir o minimizar pulsando sobre su propio botón gris rectangular, que está situado verticalmente en el lado izquierdo de la ventana de postproceso. Esto se puede observar en la imagen.

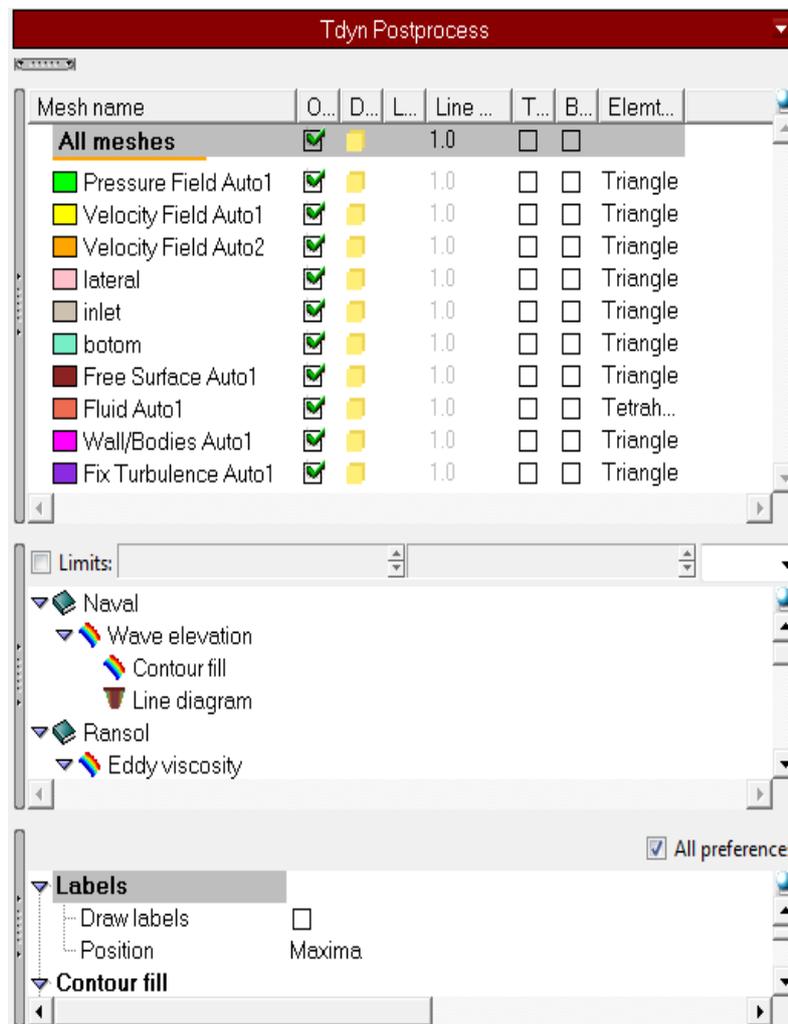


Ilustración 44: Menú del post-proceso

A continuación se describirán los siguientes conjuntos de opciones que se pueden utilizar durante el post-proceso:

- Control de animaciones.
- Selección de mallas.
- Selector de resultados.
- Selección de preferencias.

- Opciones del menú contextual

5.8.1 Control de animaciones

El control de animaciones está integrado en el programa como un reproductor de películas. Esta opción permite crear una visión de las animaciones de los resultados del proceso, donde se puede fijar los límites a lo largo de la animación o incluso definir los límites máximo y mínimo en los resultados de selección. Los tres botones en la barra de reproducción se explican por sí mismo: 'Rewind', 'play' y 'step'.

Por otra parte, al hacer clic en la barra deslizante de la animación se rebobina o avanza. Hay que tener en cuenta que es posible repetir una animación con la opción 'Repeat'. En la imagen se puede apreciar el menú de animación.



Ilustración 45: Imagen del control de animaciones

Es importante decir que si el análisis es estático, entonces el programa permite calcular de forma automática algunos pasos mediante una interpolación.

5.8.2 Selección de mallas

Esta herramienta permite ver sólo la malla que se desea y ocultar otras u ocultar la malla entera. Es útil para hacer más fácil la visualización de mallas seleccionadas en la ventana gráfica.

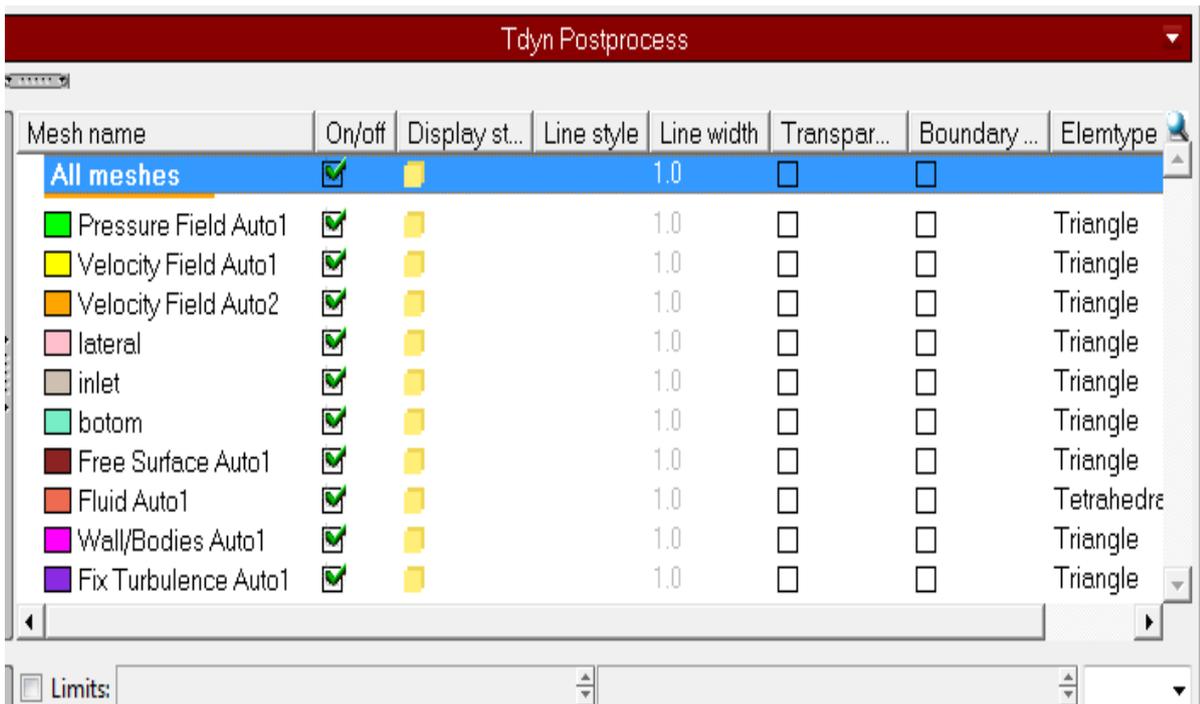


Ilustración 46: Imagen del menú del post-proceso donde se puede seleccionar las capas tipo de visualización oct.

En esta opción, se puede elegir si se quiere ver la malla en “display style”, si se quiere la superficie transparente o no en “transparent”, como ya se ha mencionado, si se quiere apagar una superficie, en “on/off”, etc.

5.8.3 Selector de resultados

Desde esta ventana se pueden seleccionar casi todas las opciones de visualización. Según el tipo de problema que se analiza se podran unos resultados u otros. Para este caso se puede visualizar, en el modulo NAVAL la opción Wave elevation (Elevación de ola) y en el modulo RANSOL se puede elegir entre presión y velocidad. En el caso de vectores, una vez se elija el resultado, el programa mostrará sus vectores nodales. Para "Contorn Fill" se permite la visualización de zonas de color, en la que una variable o un componente cambia entre dos valores predefinidos.

Es posible fijar límites máximos y mínimos para la escala de colores, que también se puede calcular de forma automática para las mallas activas o para todas las mallas.

En la imagen se puede apreciar los selectores de resultados.

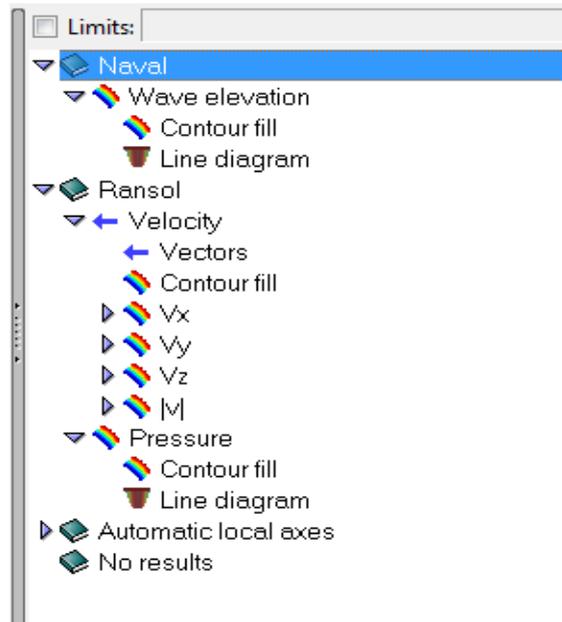


Ilustración 47: Selección de resultados

5.8.4 Selección de preferencias

Se pueden manejar varias opciones de configuración desde esta ventana, tanto en el uso básico o avanzado:

- Básico: Para las operaciones comunes, como la deformación de vista, ver las etiquetas, etc.
- Avanzado: Muestra la información que no se modifica con frecuencia.

Hay que tener en cuenta que las preferencias avanzadas sólo se puede mostrar cuando se hace clic en el botón derecho del ratón. Además el botón derecho del ratón permite restablecer los valores iniciales. Se puede apreciar este menú para el caso que se está calculando en la imagen.

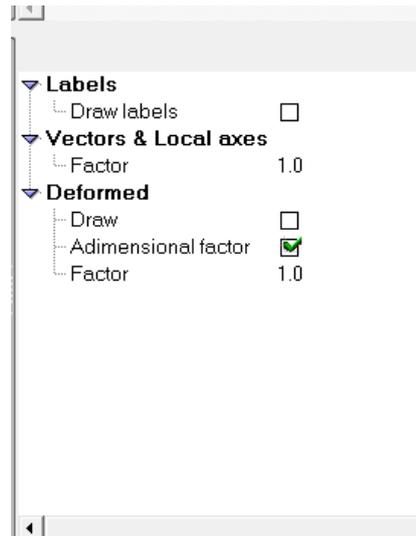


Ilustración 48: Selección de preferencias

5.8.5 Opciones del menú contextual

Por último están las opciones del menú contextual que aparece al hacer clic con el botón derecho como muestra la imagen.

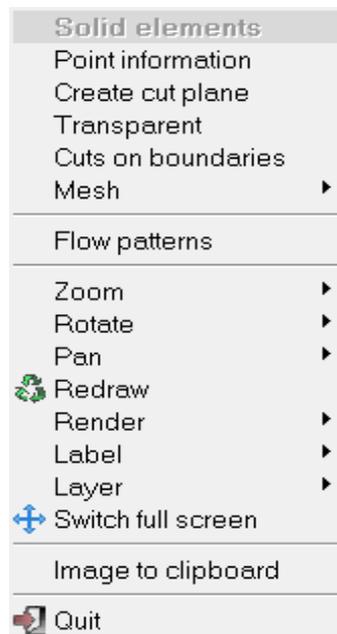


Ilustración 49: Menú contextual

La opción de “point information” da información, datos sobre un punto seleccionado. También se puede crear un corte en el modelo, esta herramienta

permite la creación de cortes en los volúmenes y cortes de línea en la superficie y los límites de los volúmenes dibujando una línea. Para los cortes de línea, la línea irá desde el punto inicial al punto final. Por último, también están las opciones de “ Transparent” , “Cut on boundaries” y “Flow Patterns” esta ultima utilizada para el seguimiento de las partículas mediante la definición de un punto en el espacio de más de un campo de velocidad.

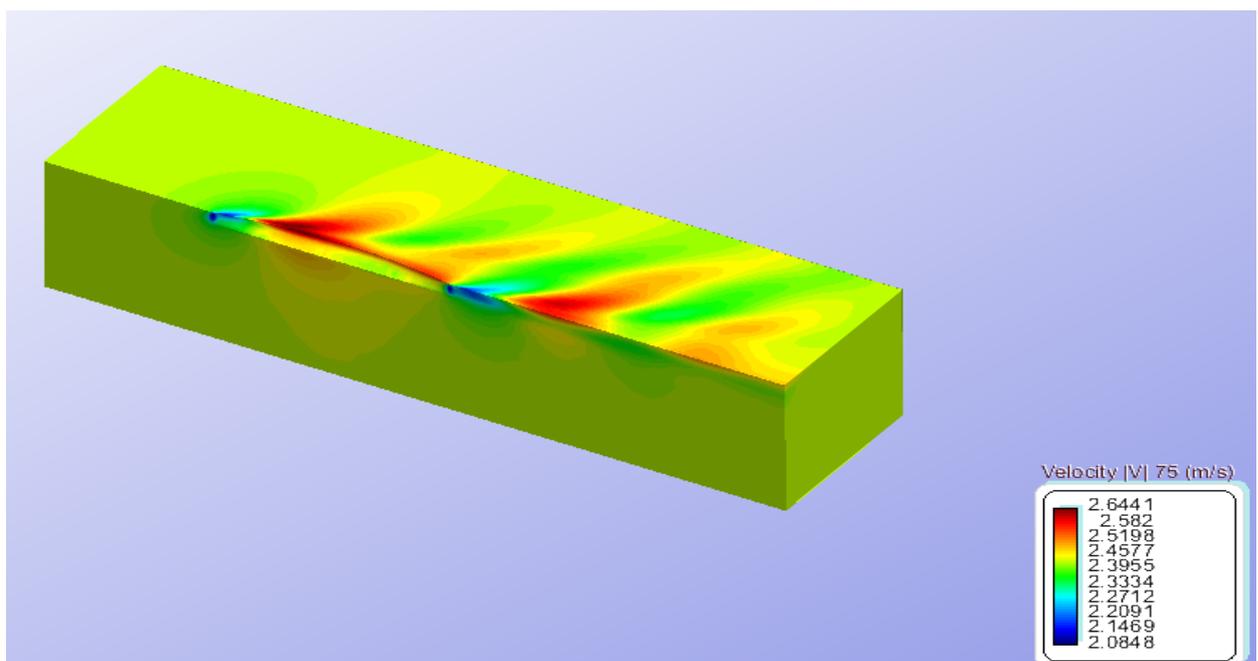
Por último hay que decir que se puede obtener gráficos en el post-proceso tradicional.

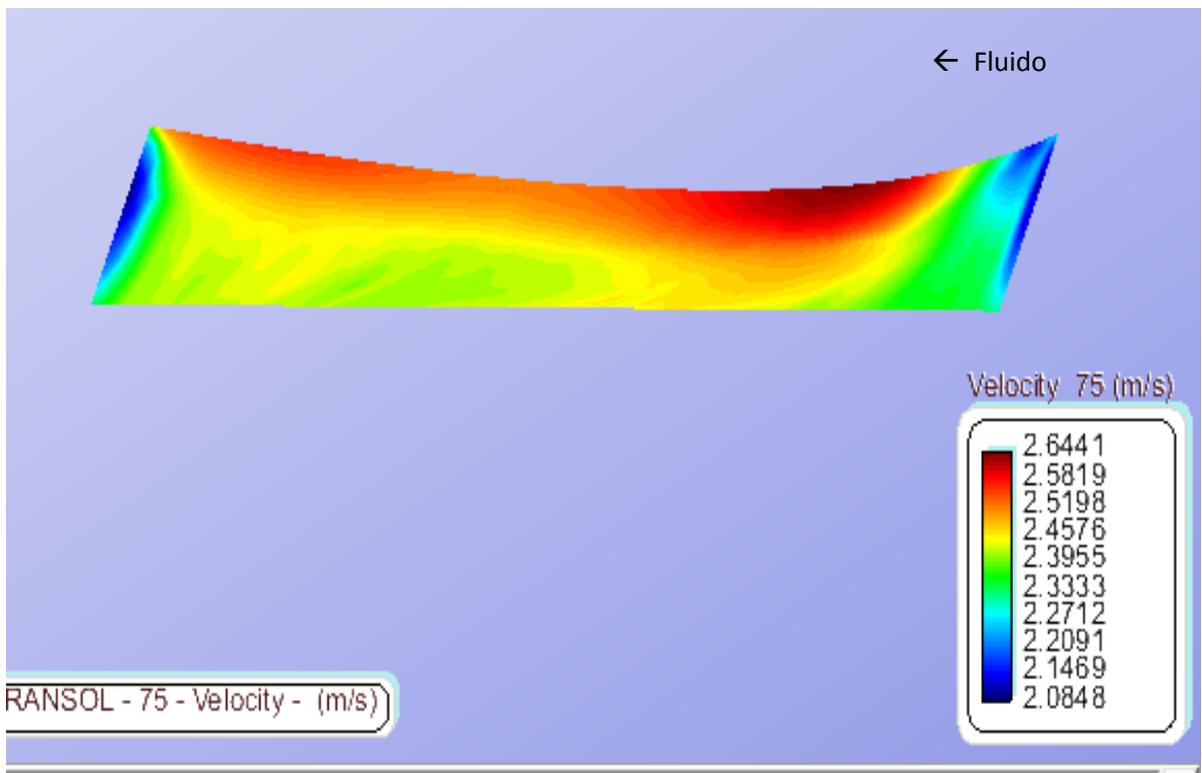
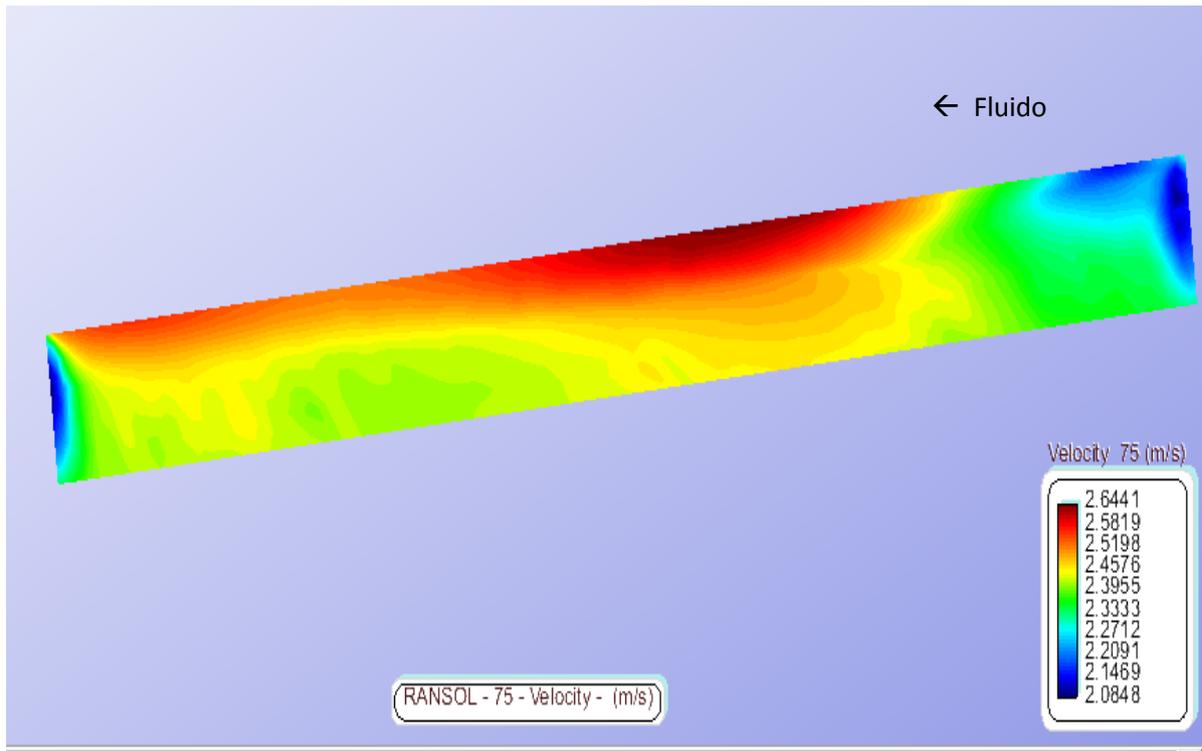
Con esto se ha explicado todo lo que se debería hacer para resolver el problema del Wigley, el siguiente paso es la presentación de los resultados.

5.9 Resultados

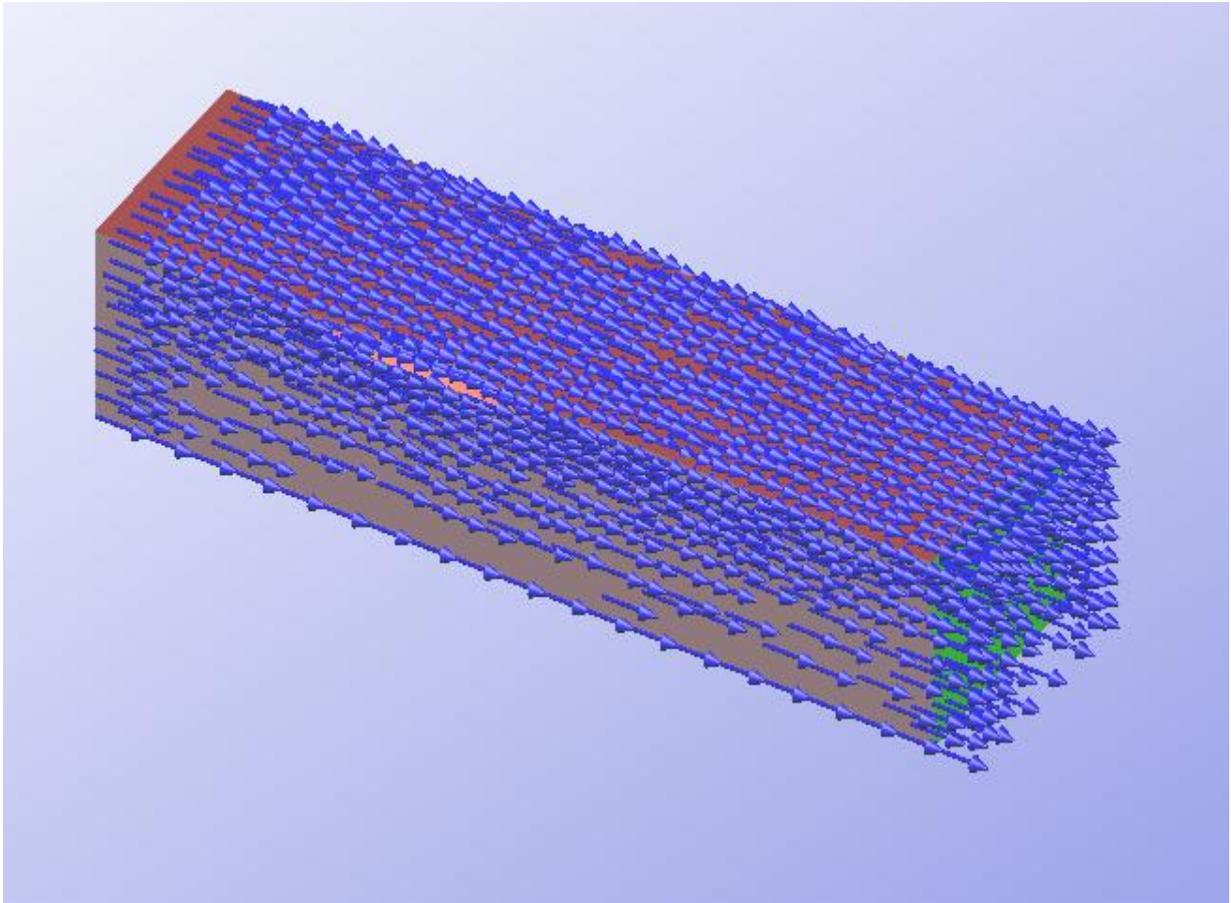
Una vez hechos los cálculos y todos los pasos que se han mencionado anteriormente se procederá a obtener los resultados en el post-proceso de la manera que se ha explicado en el apartado del post-proceso. Los resultados son los siguientes para la carena Wigley.

- **Distribución de velocidades** (las velocidades están en m/s)

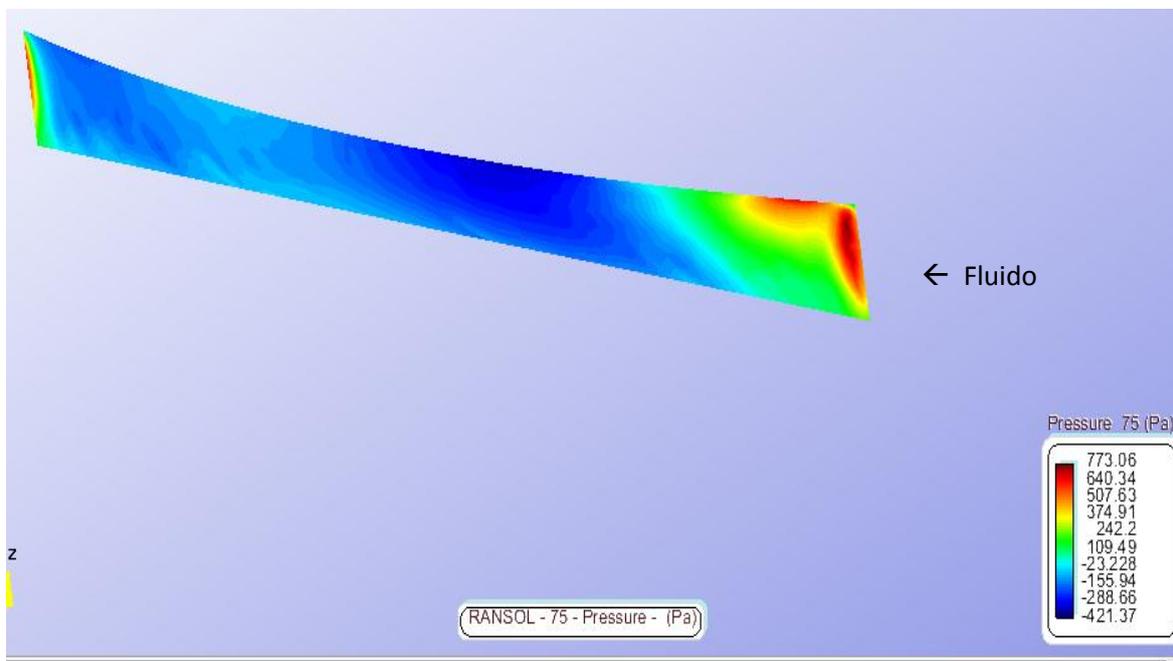
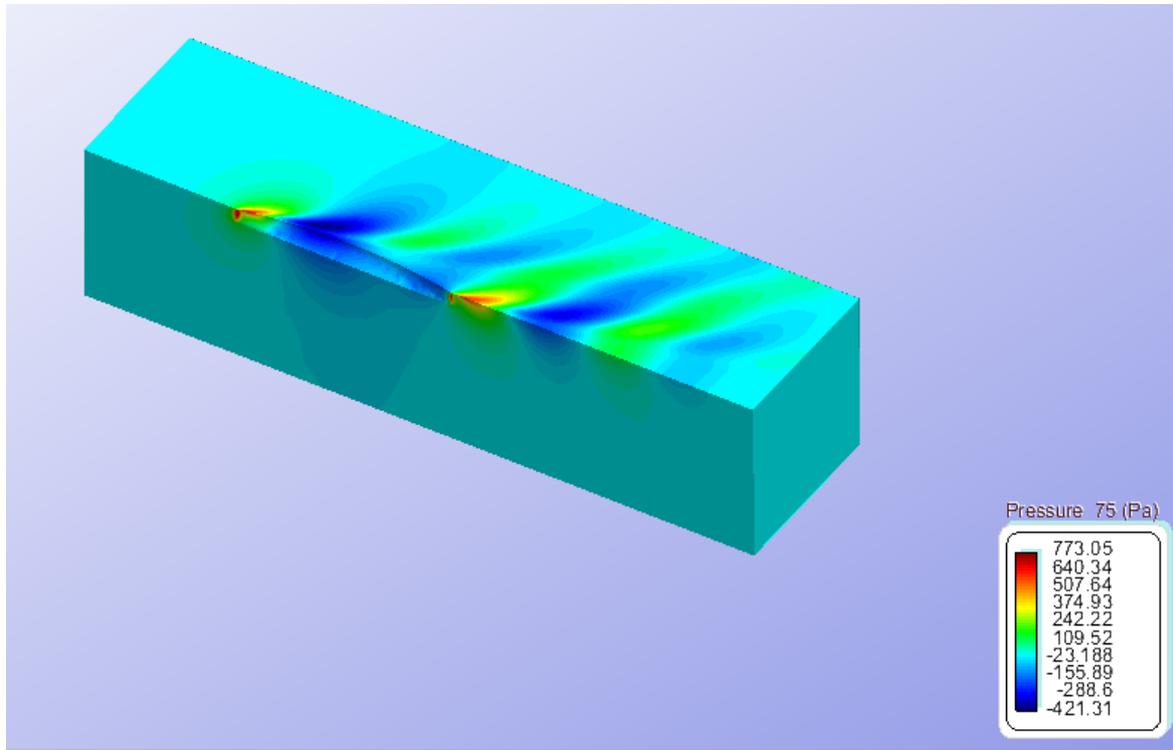


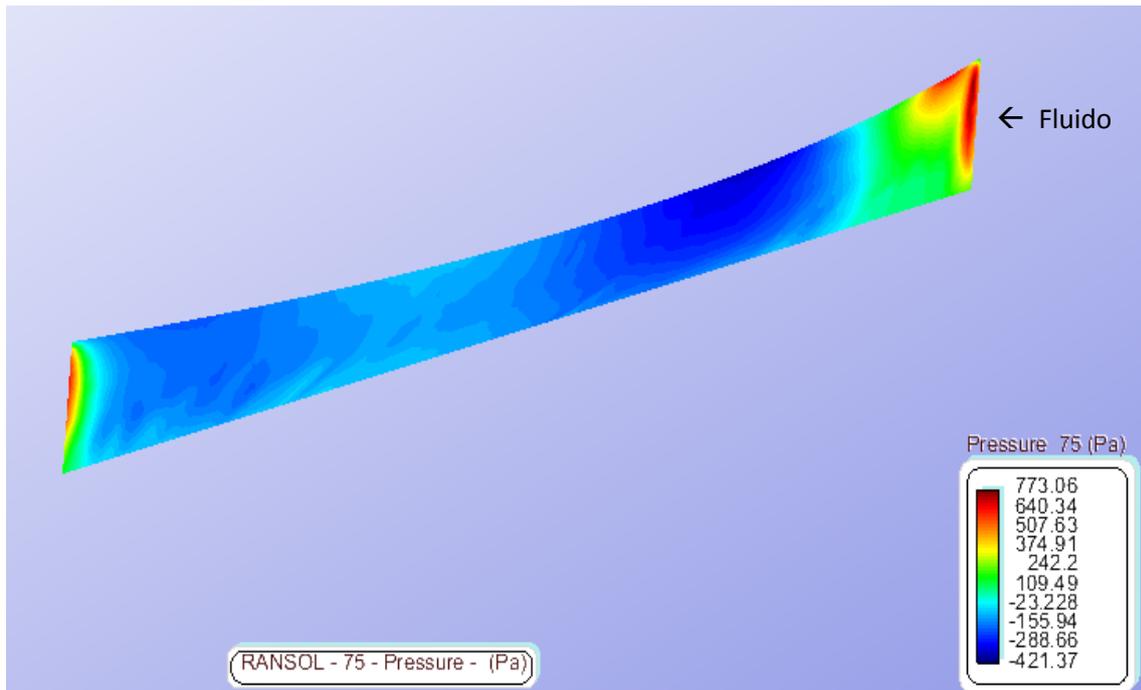


- **Vectores de velocidad**

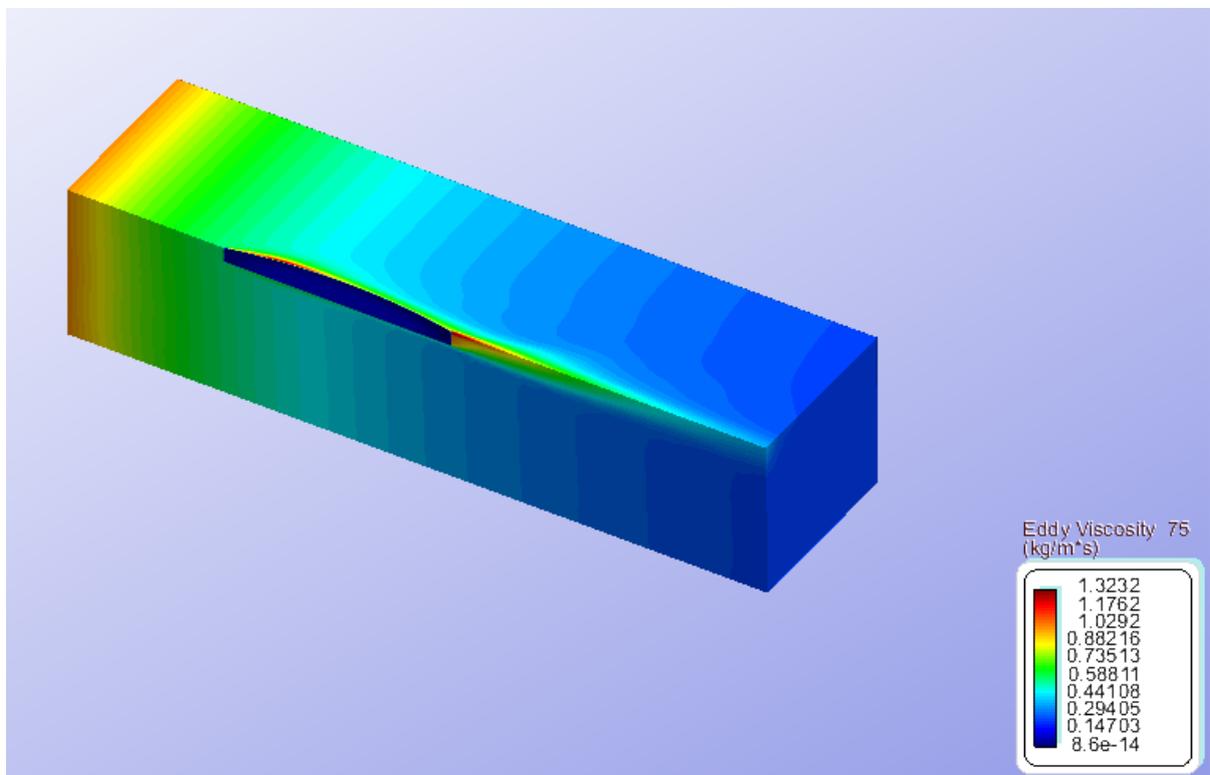


- **Distribución de presiones** (la presión en Pascales)

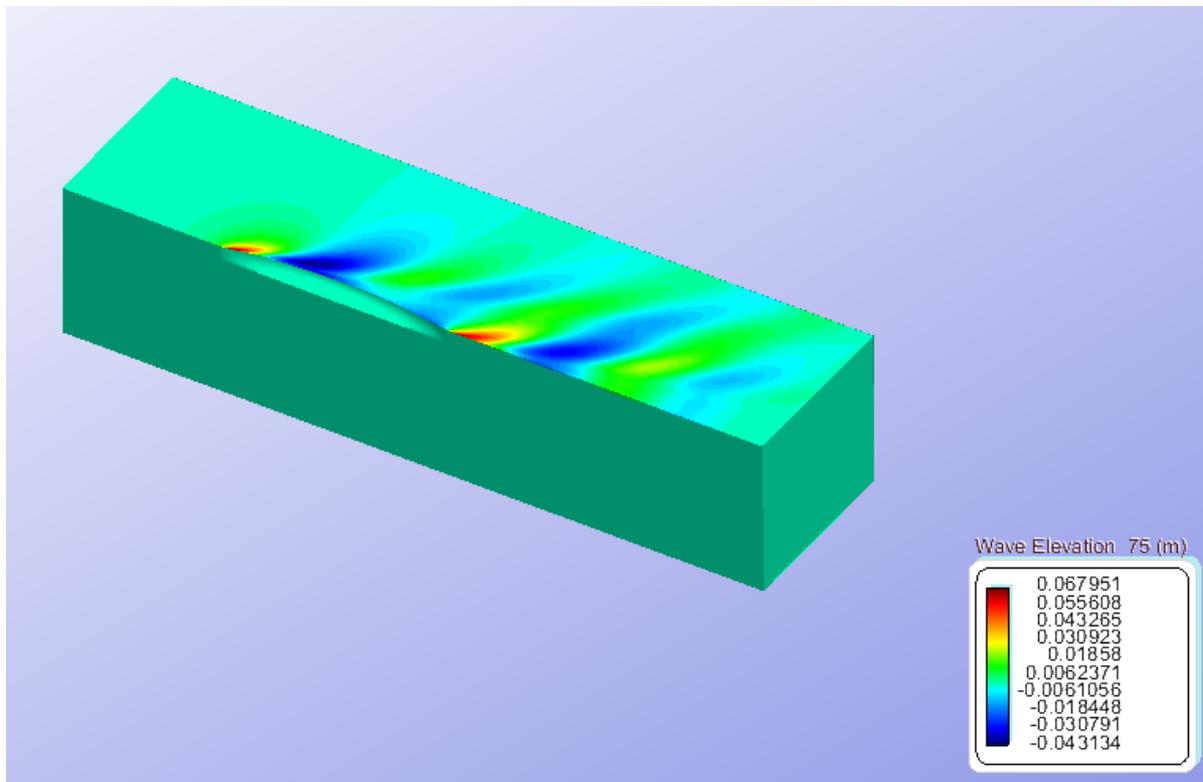




- **Distribución de viscosidad** (la viscosidad en $\text{kg/m}^2\text{s}$)



- **Distribución de la elevación de ola** (la elevación en metros)

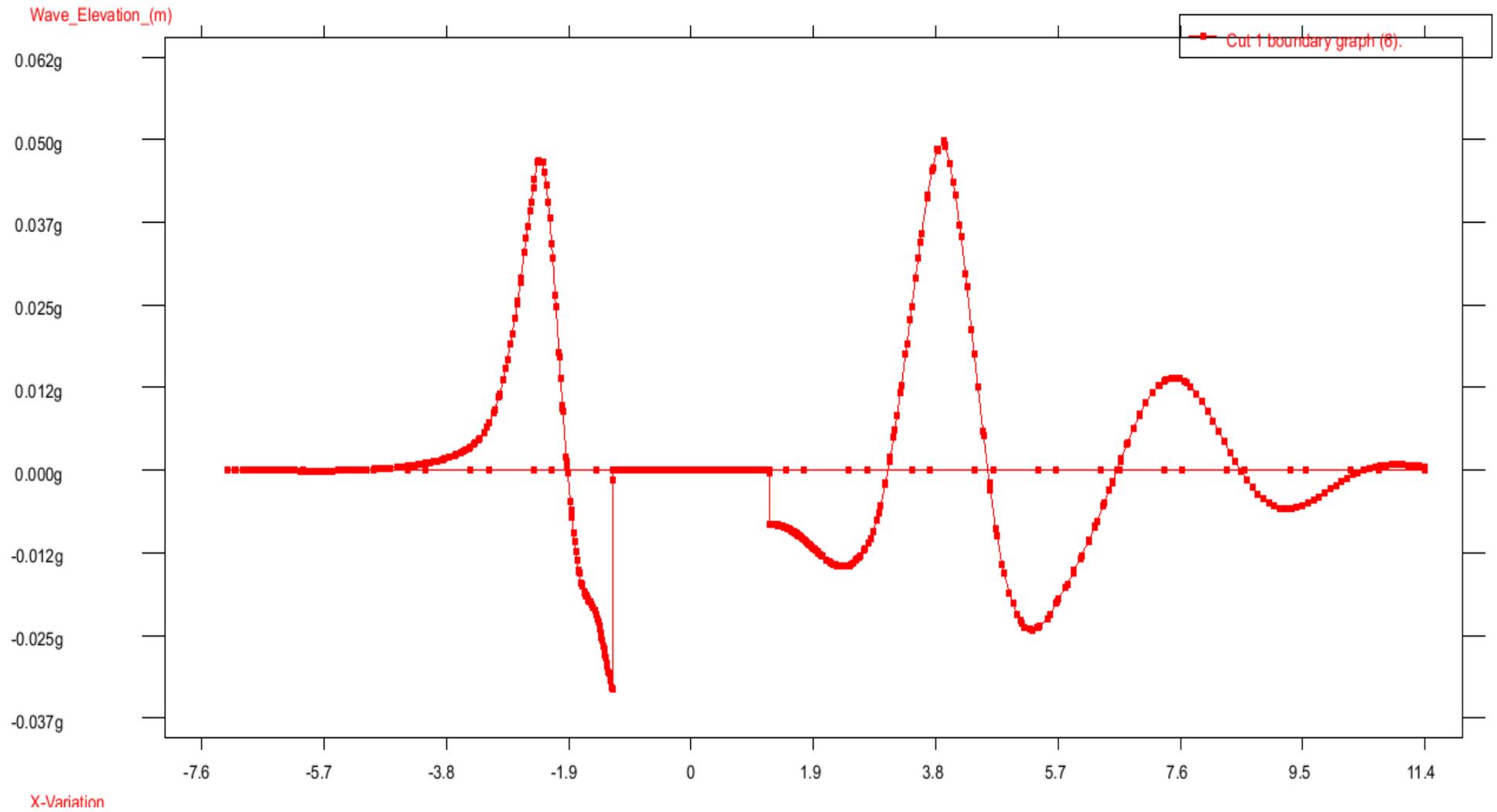


- **Cortes longitudinales elevación de ola**

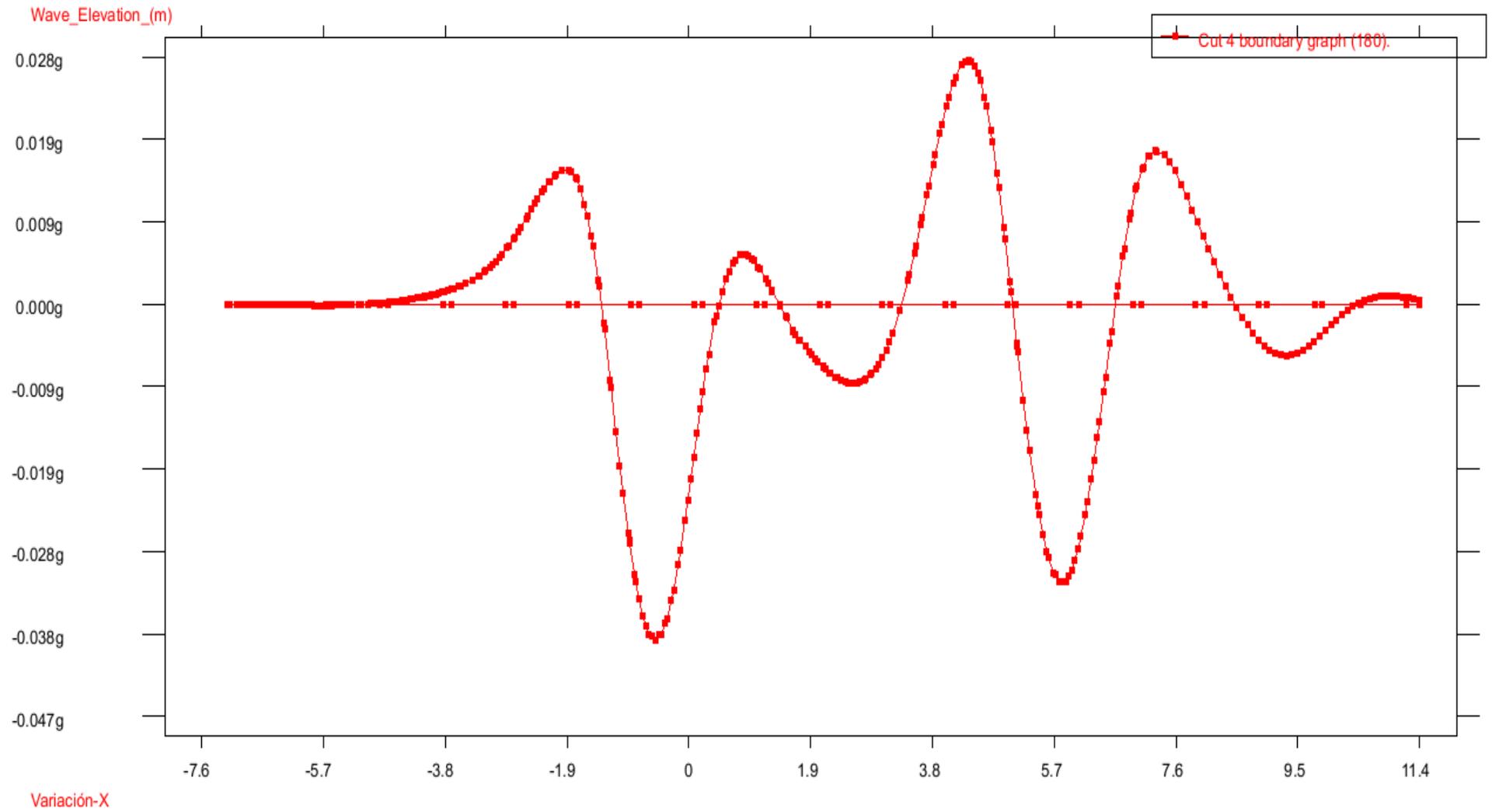
Se han realizado 20 cortes equidistantes en la dirección de crujía y hacia estribor, aquí se mostrará el corte de crujía y después los cortes pares del 4 al 20 ya que han salido muy juntos y no es necesario mostrar los resultados de todos ellos.

En la representación gráfica de los cortes de la olas, en el eje de las ordenadas se tiene el valor de la altura de la ola en metros y en el eje de las abscisas está representada la longitud del volumen de control.

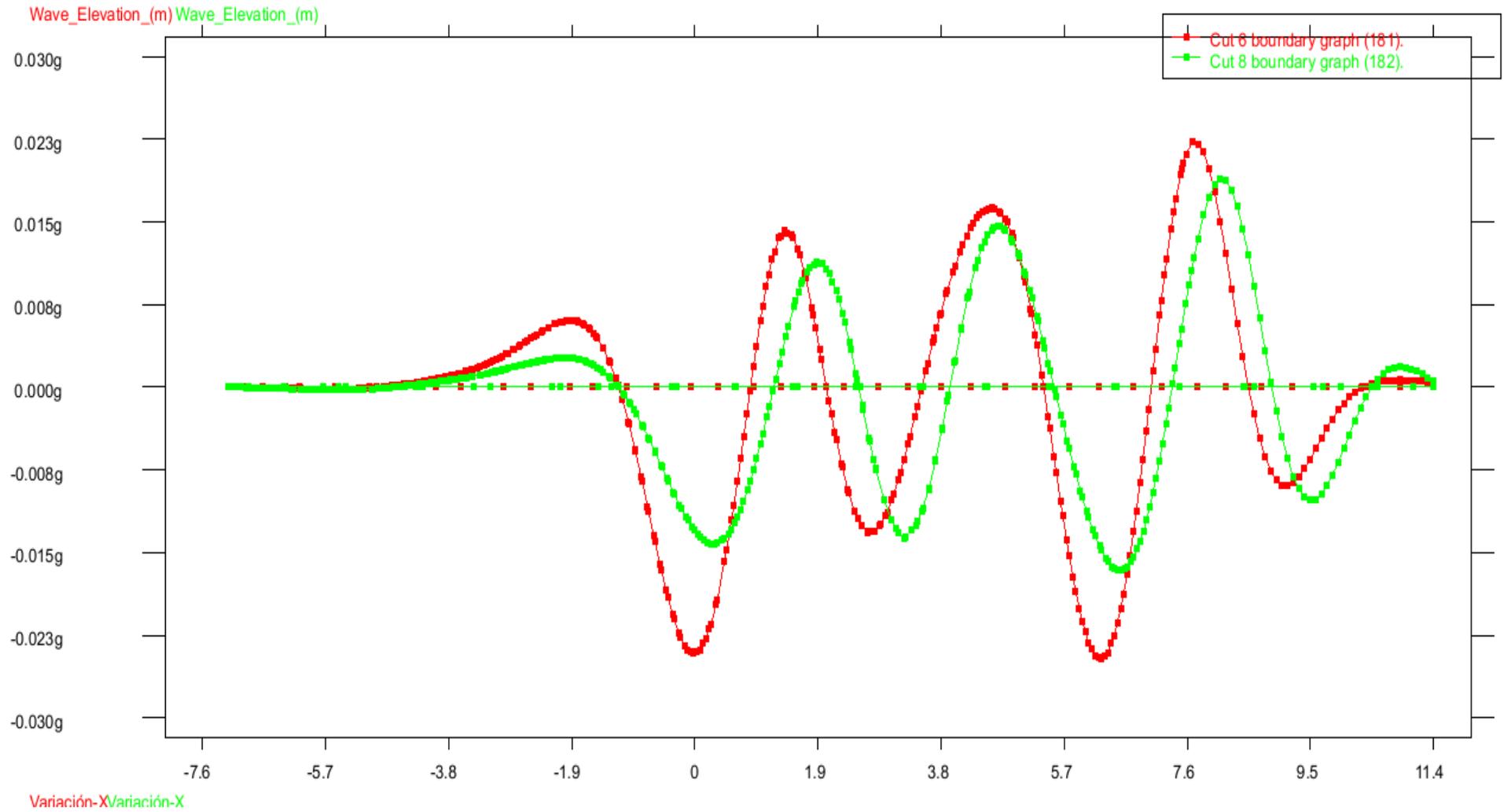
Corte 1 (corte de crujía)



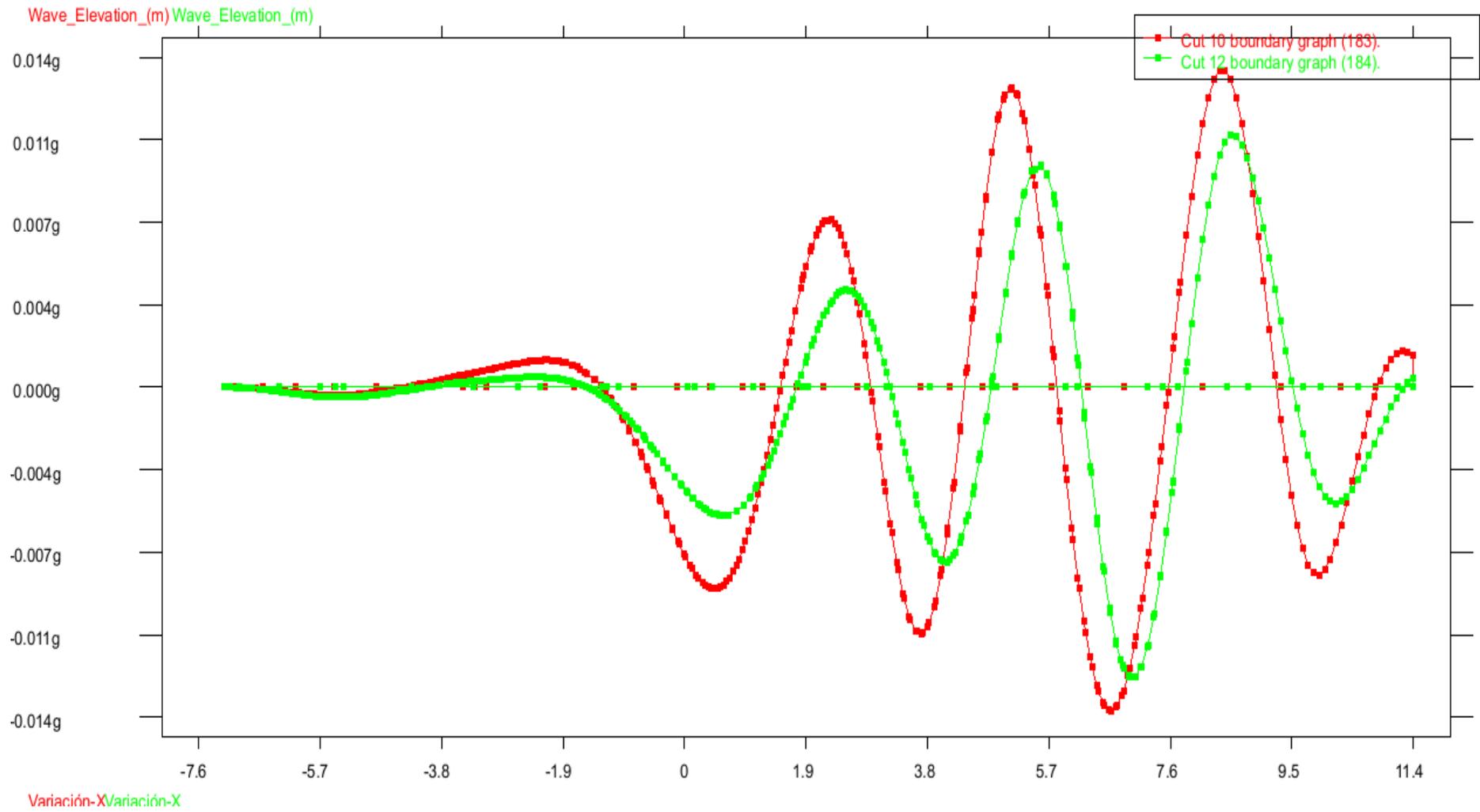
Corte 4



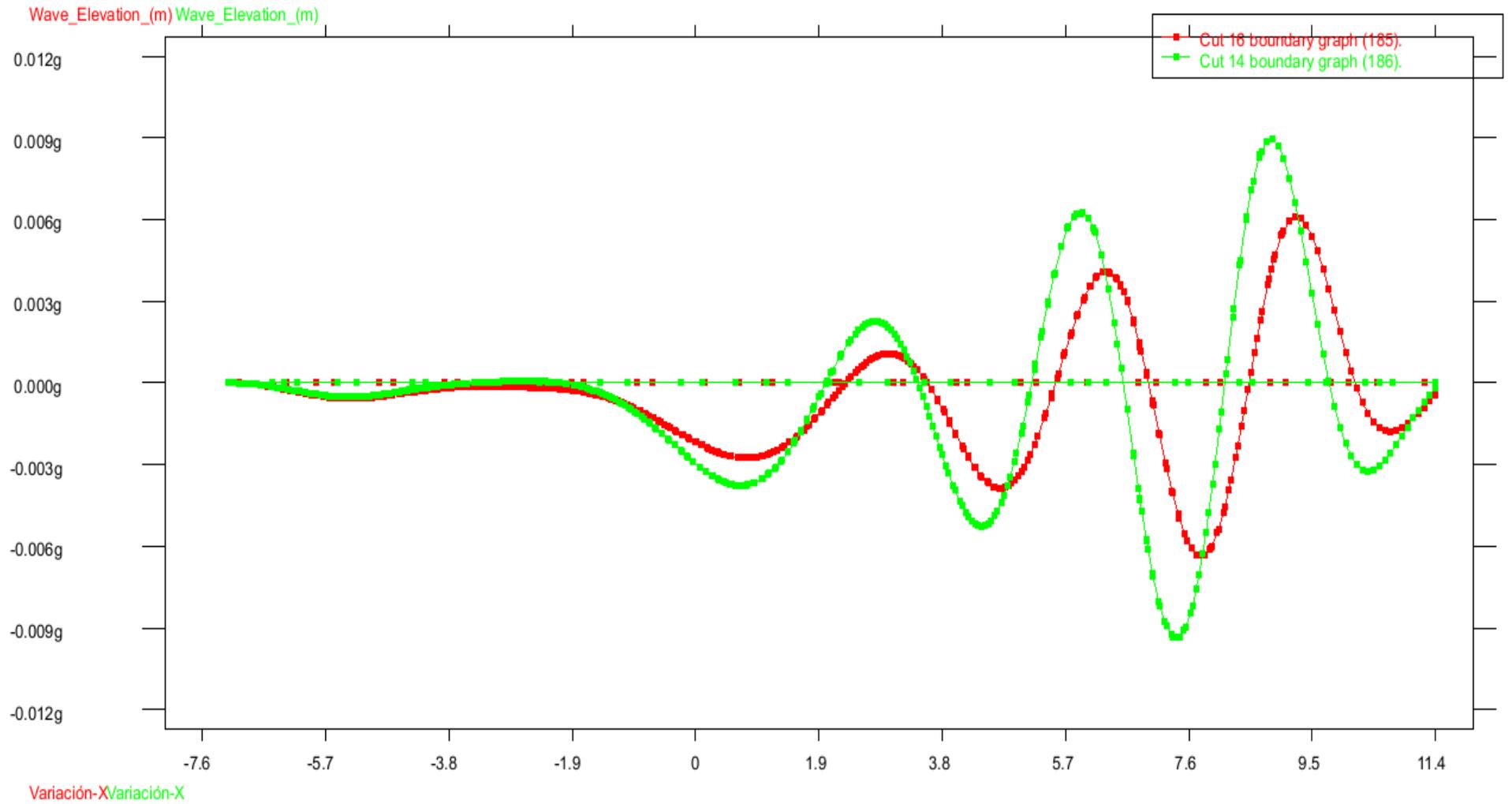
Corte 6 y 8



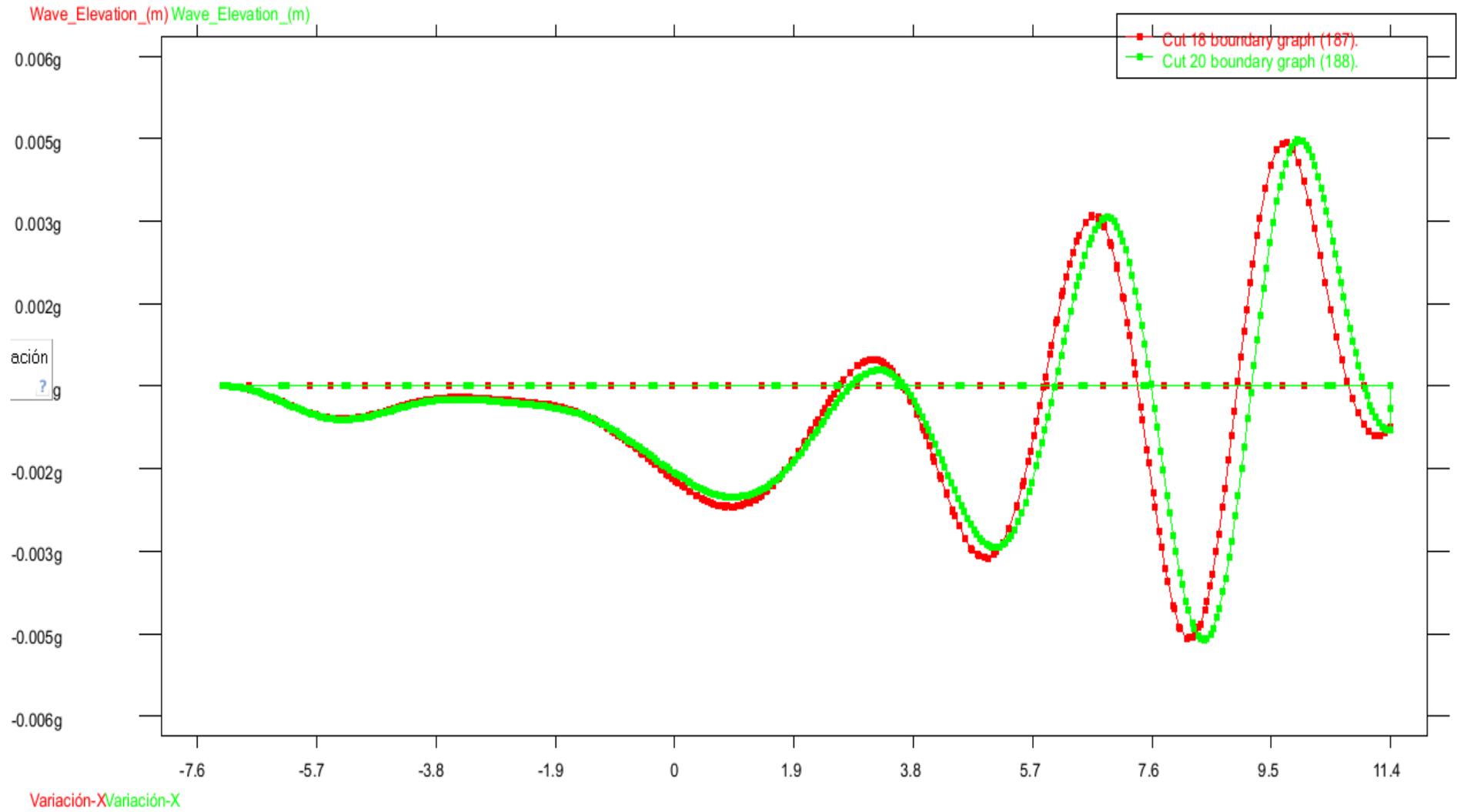
Corte 10 y 12



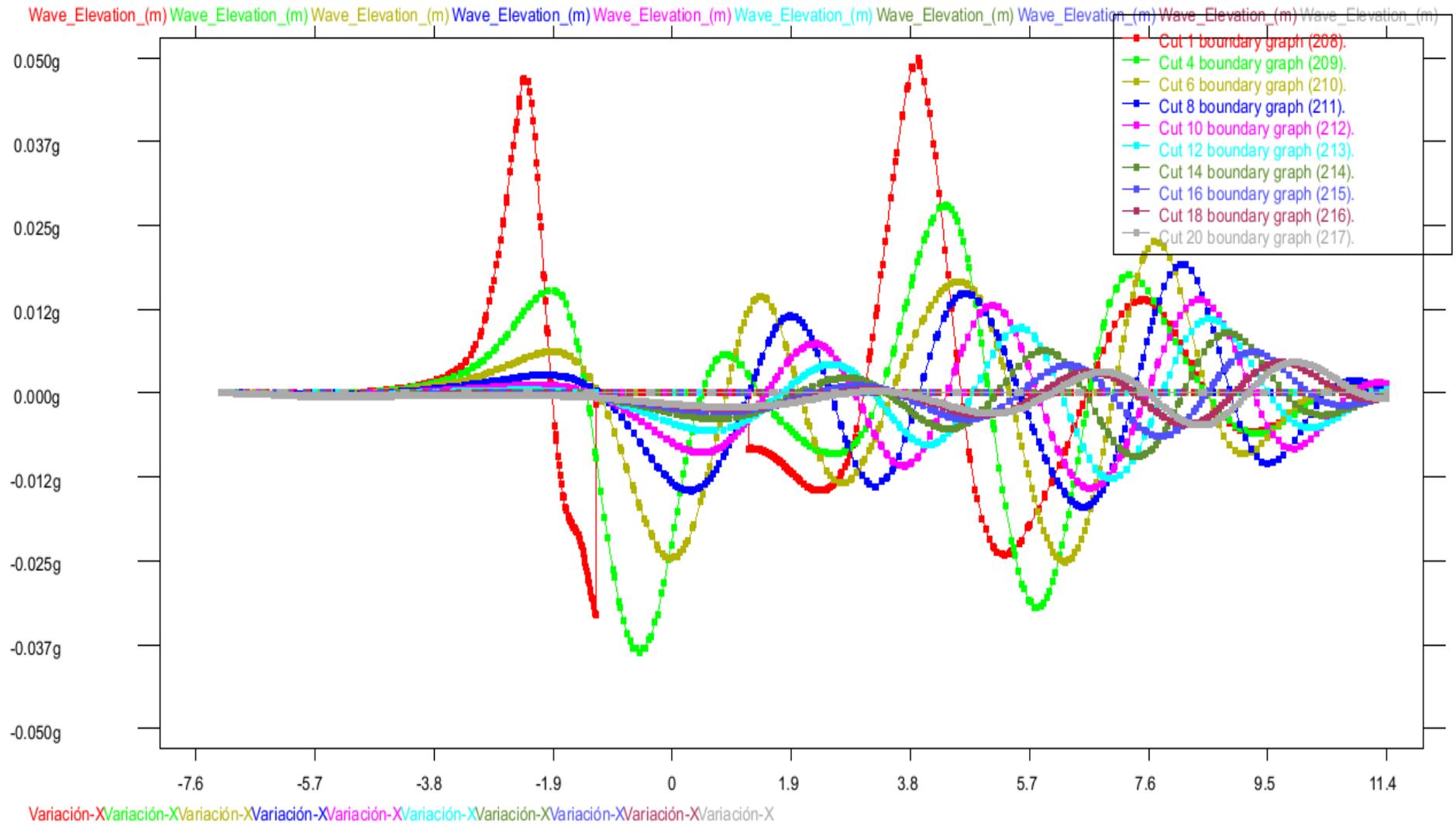
Corte 14 y 16



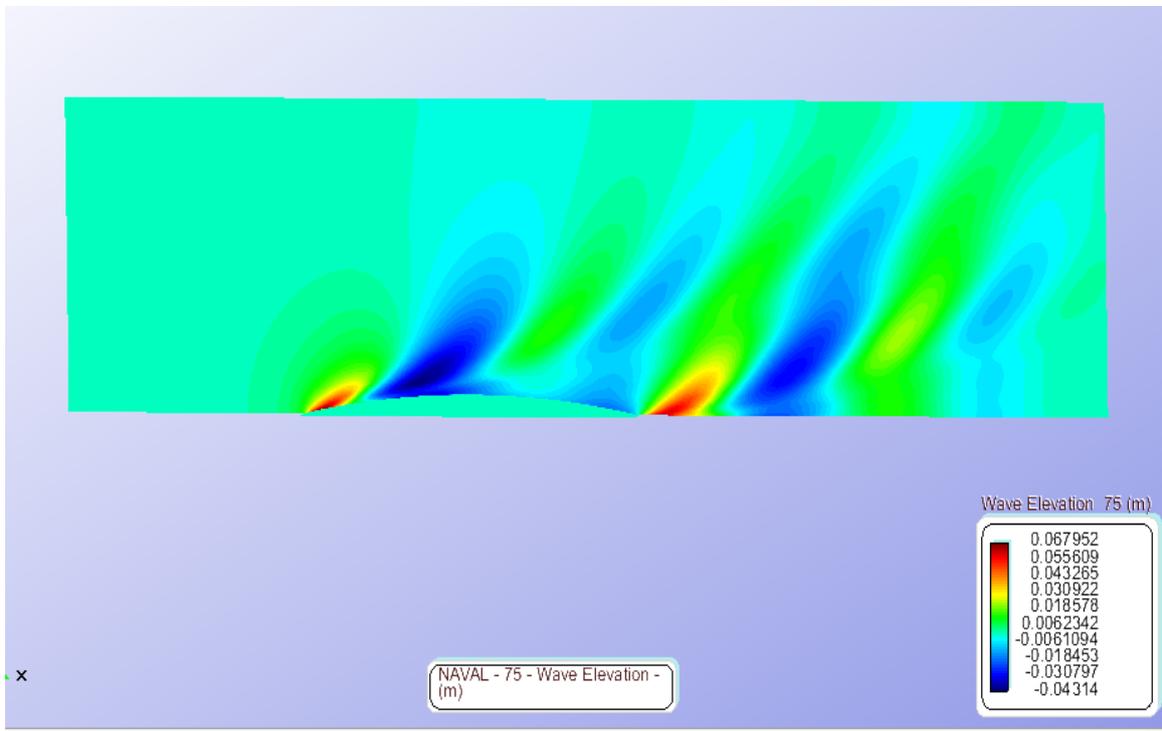
Corte 18 y 20



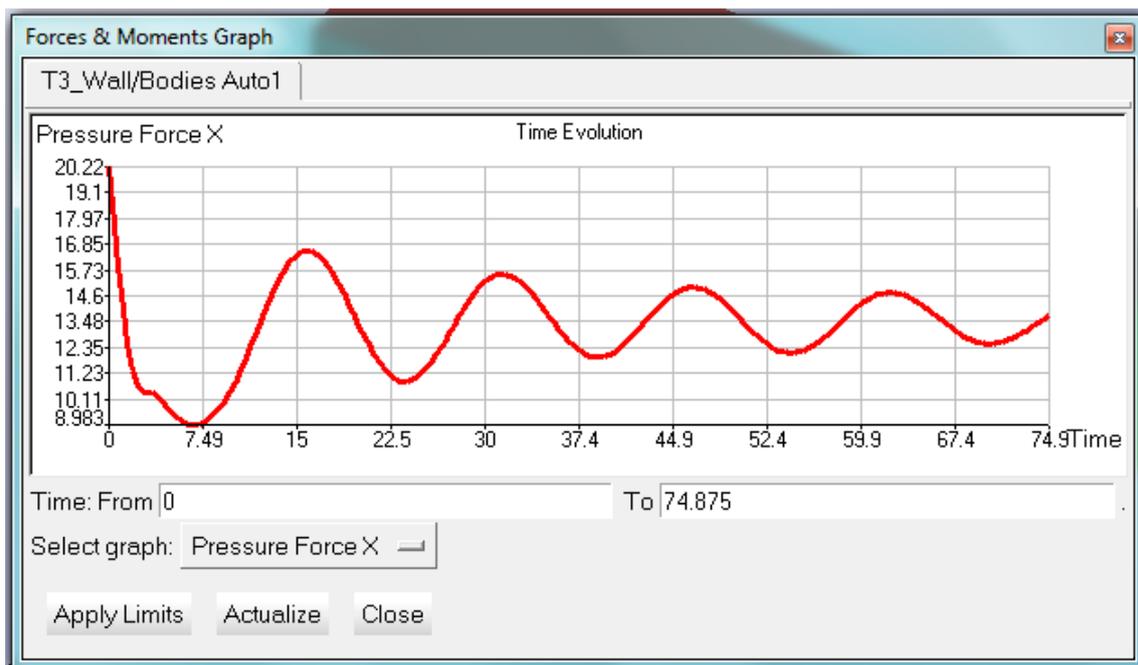
Todos los cortes



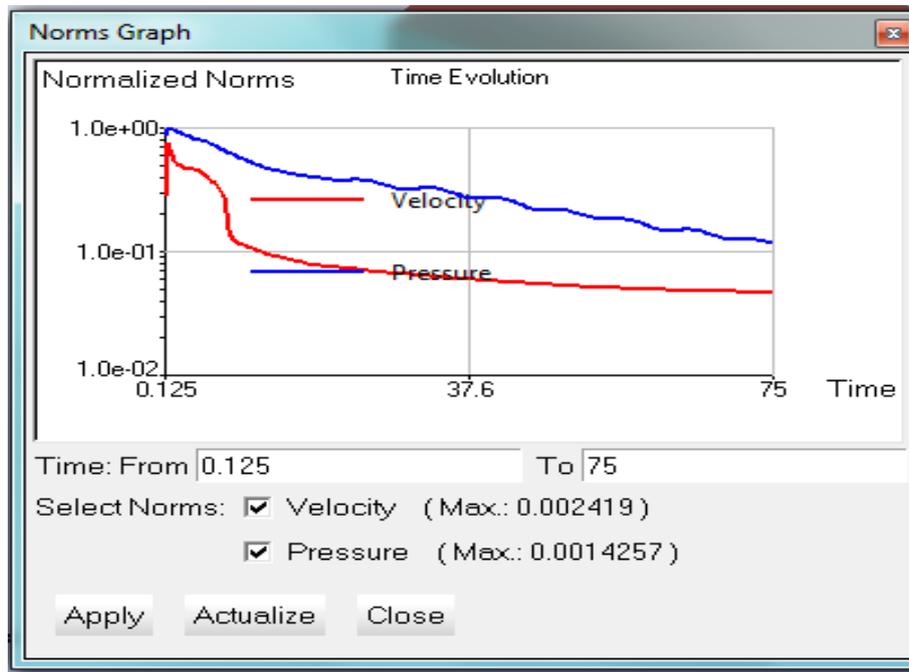
- **Elevación de ola en la superficie libre**



- **Gráfico de fuerzas y momentos**

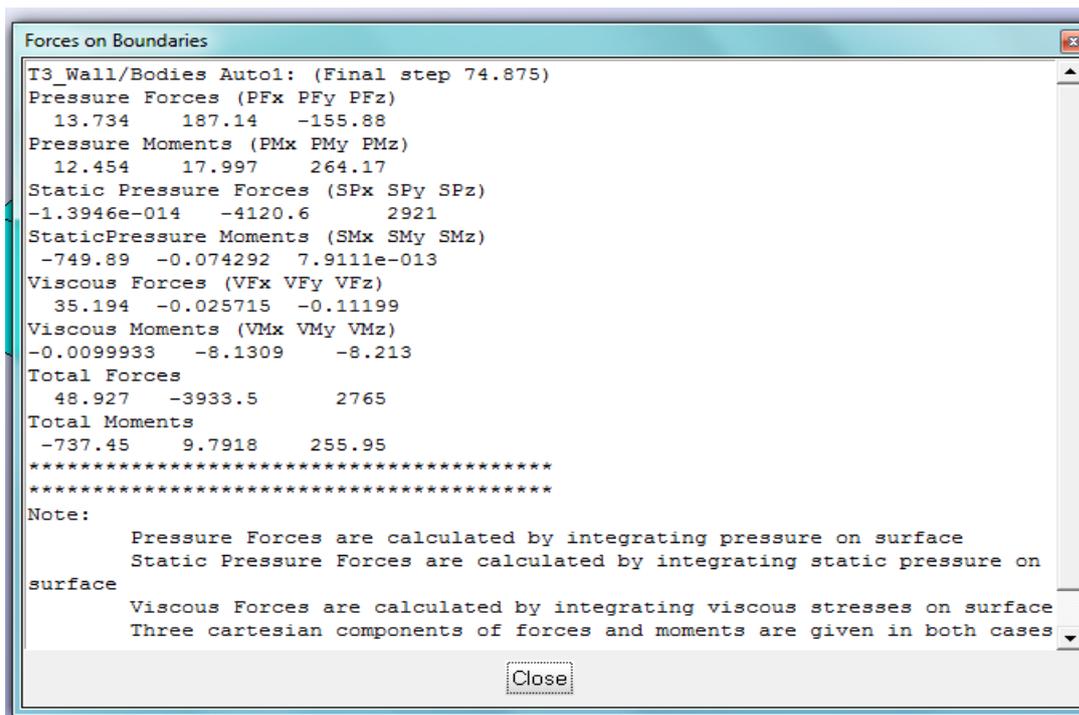


- **Gráfico de Norms**



- **Resultado de fuerzas y momentos**

Forma de presentación de los resultados obtenidos por Tdyn en lo que a las fuerzas y momentos se refiere.



- **Tabla de tiempos**

-Total Time	1332.3[s] (100.0[%])	1
-Reading Fluid	4.8[s] (357.3[%])	1
• Assembling System Matrixes	1.9[s] (40653.6[%])	1
• Assembling 4NodesTetrahedra	1.9[s] (98899.6[%])	1
• Other operations	2.8[s] (59.3[%])	
-Reading Total	0.0[s] (0.0[%])	1
-Initialising Fluid Domain	0.2[s] (12.3[%])	1
-Distance Field Calculation	0.1[s] (10.3[%])	1
-Initial Interval Calculations	112.5[s] (8441.1[%])	50
• Solving Pre-Uncoupled Problems	0.0[s] (0.2[%])	50
• Assembling Convective Matrixes	6.8[s] (6019.2[%])	50
• Solving Coupled Problems	99.7[s] (88671.1[%])	50
• Solving Mass Conservation Equation	68.0[s] (68189.1[%])	100
• Preconditioning	6.5[s] (9549.7[%])	100
• Solving	56.5[s] (83047.0[%])	100
• Other operations	5.0[s] (7.4[%])	
• Solving Velocity (Momentum Equation) ...	31.1[s] (31166.2[%])	50
• Preconditioning	9.9[s] (31895.9[%])	150
• Solving	16.3[s] (52489.7[%])	150
• Other operations	4.9[s] (15.6[%])	
• Solving Projection (Momentum Equation) .	0.6[s] (643.7[%])	50
• Checking Convergence	0.1[s] (103.2[%])	50
• Solving Post-Uncoupled Problems	4.0[s] (3551.4[%])	50
• Solving Transpiration	4.0[s] (99990.3[%])	50
• Finishing Time Step	0.1[s] (78.9[%])	50
• Other operations	1.8[s] (1.6[%])	
- Interval Calculations	1213.3[s] (91067.5[%])	600
• Initialising New Time Step	19.9[s] (1643.7[%])	600
• Solving Pre-Uncoupled Problems	0.0[s] (0.1[%])	600
• Assembling Convective Matrixes	79.9[s] (6588.1[%])	600
• Solving Coupled Problems	983.4[s] (81053.9[%])	600
• Solving Mass Conservation Equation	362.8[s] (36893.7[%])	601

- Preconditioning 38.4[s] (10577.6[%]) 601
- Solving 295.1[s] (81329.6[%]) 601
- Other operations 29.4[s] (8.1[%])
- Solving Velocity (Momentum Equation) ... 481.7[s] (48985.1[%]) 600
 - Preconditioning 116.4[s] (24153.3[%]) 1800
 - Solving 307.9[s] (63917.6[%]) 1800
 - Other operations 57.5[s] (11.9[%])
- Solving Projection (Momentum Equation) . 7.1[s] (722.7[%]) 600
- Solving Eddy Kinetic Energy 121.5[s] (12355.5[%]) 600
 - Preconditioning 38.7[s] (31850.8[%]) 600
 - Solving 43.9[s] (36119.1[%]) 600
 - Other operations 38.9[s] (32.0[%])
- Other operations 10.3[s] (1.0[%])
- Checking Convergence 1.6[s] (133.3[%]) 600
- Solving Post-Uncoupled Problems 89.1[s] (7340.8[%]) 600
 - Solving Transpiration 89.1[s] (99995.6[%]) 600
- Finishing Time Step 0.9[s] (77.7[%]) 600
- Printing Results 37.0[s] (3053.2[%]) 600
- Other operations 1.3[s] (0.1[%])

-Printing Results 0.5[s] (36.5[%]) 1

6 Caso práctico de la carena de un buque

En este apartado se realizará la descripción de todos los pasos a seguir para el análisis, se mostrará los pasos realizados en el programa CAD para la realización de la carena y los bulbos, y se explicarán las condiciones de contorno a aplicar en el Tdyn.

El estudio consiste en realizar un análisis de dos carenas idénticas, solo diferenciadas en que se analizará, una con bulbo y otra sin bulbo para saber cuál de las dos carenas es más eficiente y mejor.

En primer lugar se ensayará el modelo original y se analizarán los resultados obtenidos, y posteriormente se le acoplará un bulbo y se compararán los resultados obtenidos con los del modelo original.

Una vez se tengan todos los resultados se valorará si es adecuado ponerle a este tipo de barco un bulbo, o si sería mejor dejarlo con las formas originales.

6.1 Geometría

Para la creación de la geometría se disponía del casco de un buque por tanto, lo que se ha hecho, ha sido adecuar este casco para poder importarlo en el Tdyn para su análisis.

El casco estaba creado con el programa Maxsurf, ha sido exportado al programa de CAD Rhinoceros para poder trabajar con este casco.

Al casco había que recortarle las superficies sobrantes. En un principio el buque estaba como se muestra en la siguiente fotografía.

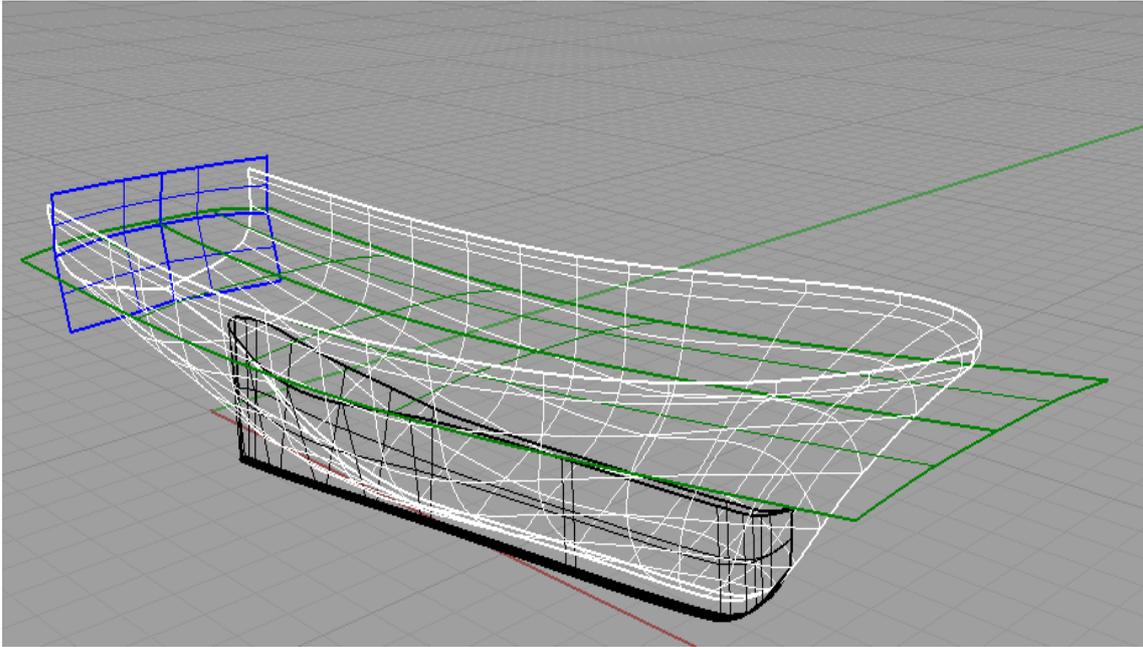


Ilustración 50: Geometría del buque a analizar

Mediante las herramientas necesarias en Rhinoceros se recortaron las superficies del espejo, de la cubierta y de la quilla.

El resultado de ese trabajo es el siguiente:

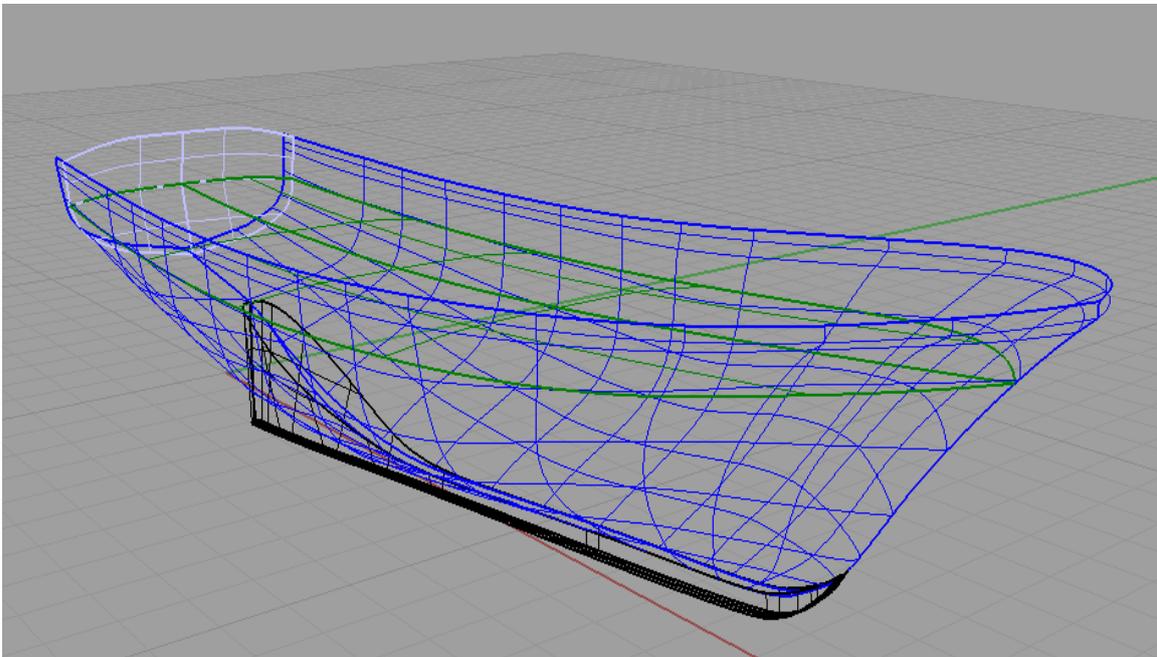


Ilustración 51: Geometría recortada

Después de recortar estas superficies aún hay que hacer otra operación.

Como el buque es simétrico, teniendo solo uno de los costados bastará. También hay que tener en cuenta que hay que recortarlo haciendo un plano a la altura de la flotación que es de 1,97 m sobre el plano base, ya que solo se necesitará la parte sumergida del casco para hacer el análisis en el Tdyn. Una vez hecho esto se obtendrá el casco que se quería para exportarlo como IGES al Tdyn.

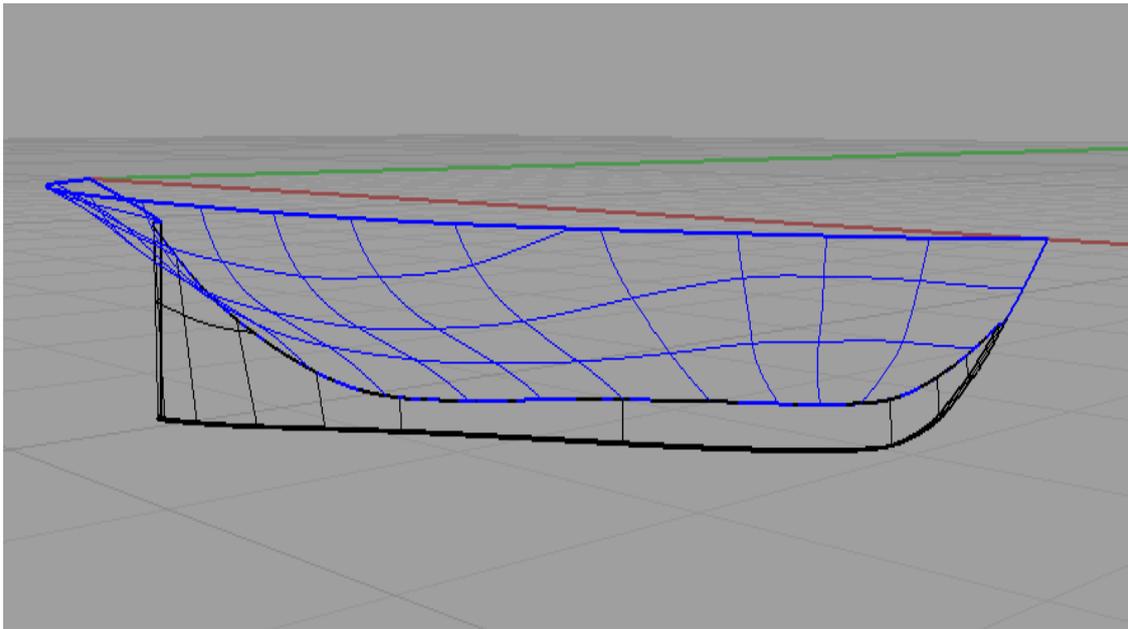


Ilustración 52: Geometría de la obra viva

Como se puede observar, la línea de flotación está por debajo del espejo de popa.

Lo último en tener en cuenta es que el punto (0,0,0) se colocara en el punto más a popa y más elevado para facilitar el proceso de la creación del volumen de control en el Tdyn.

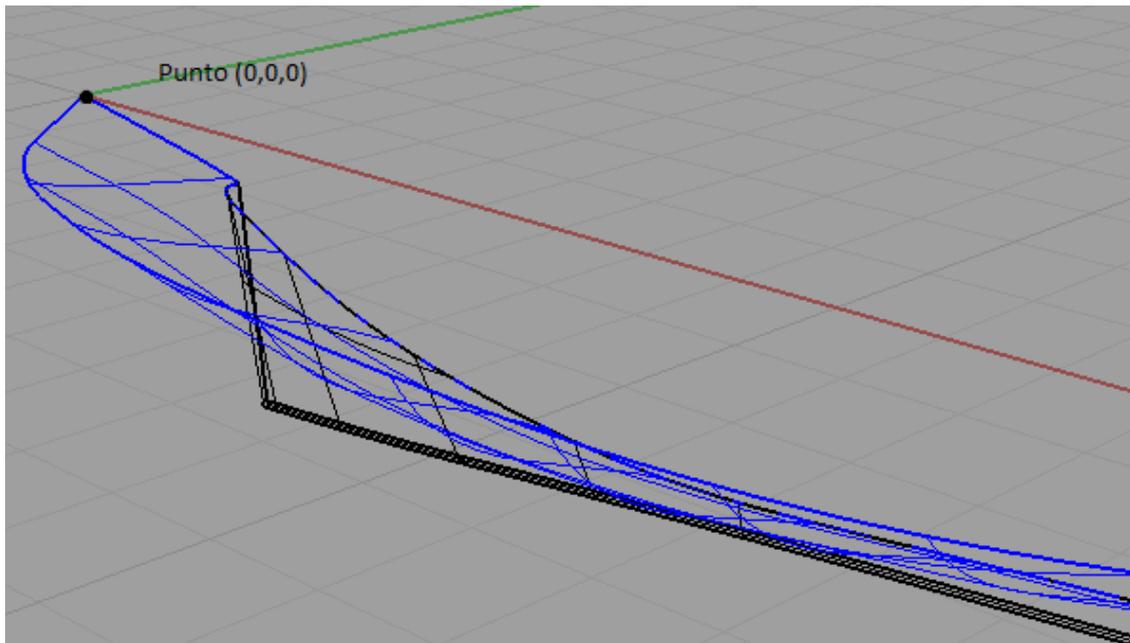


Ilustración 53: Colocación del punto de origen

6.2 Creación del bulbo

Las soluciones propuestas para la posible mejora del rendimiento de la carena original han sido las de acoplarle un bulbo y analizarlo para ver si los resultados obtenidos son lo suficientemente convincentes para llevar a cabo una posible reforma del casco.

El casco con bulbo es exactamente el mismo casco con la diferencia de que se le ha acoplado un bulbo. Para acoplarle el bulbo se ha utilizado el programa de CAD Rhinoceros.

El bulbo utilizado es un bulbo de un barco real escogido aleatoriamente.

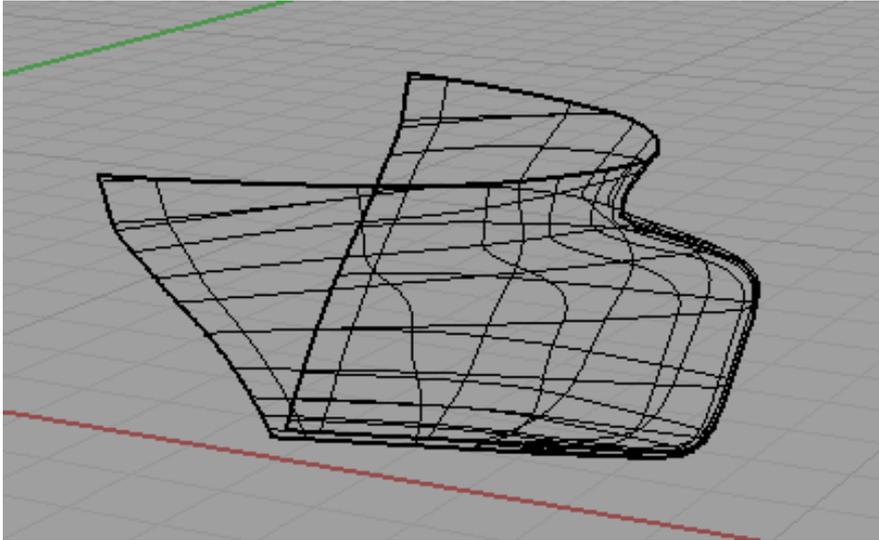


Ilustración 54: Vista lateral del bulbo

Como este bulbo es un trozo de un barco distinto, se ha tenido que cortar la parte de popa y la parte alta, y luego crear una superficie que se adaptara al casco. Otro inconveniente es que el modelo de bulbo está abierto por debajo, por lo que se ha tenido que cerrar.

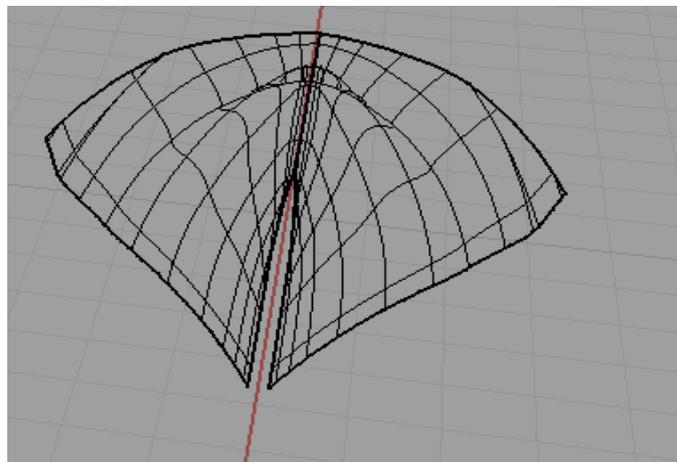


Ilustración 55: Vista de la planta del bulbo

Todo esto se ha hecho en el Rhinoceros con las herramientas pertinentes.

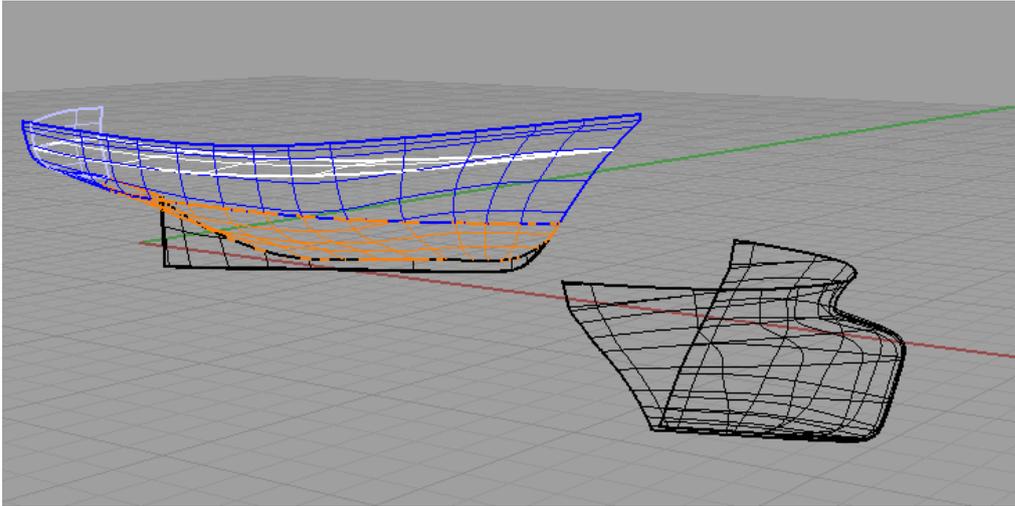


Ilustración 56: Vista de casco y bulbo

El primer paso es la unión del bulbo y el casco, cuando se ha hecho esta operación se ha podido observar que bulbo y casco no tenían las mismas formas.

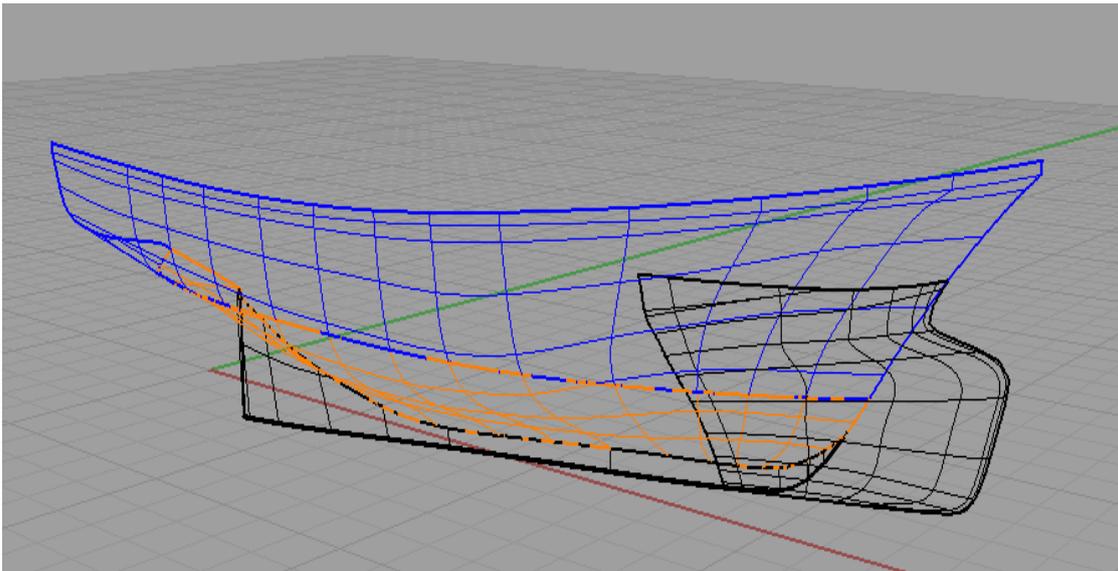


Ilustración 57: Unión de casco y bulbo

Una vez realizadas las operaciones correspondientes mediante las herramientas del Tdyn, el resultado final se puede observar en la siguiente imagen.

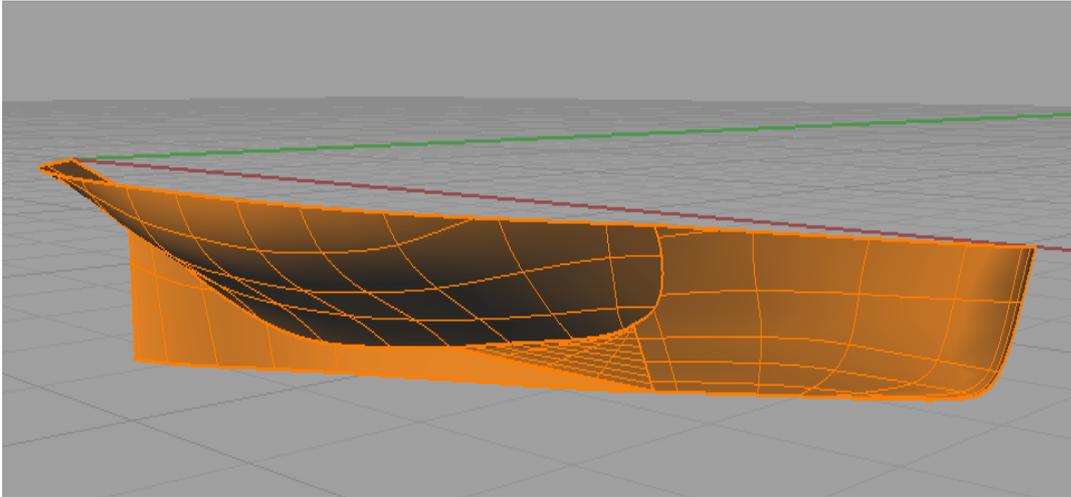


Ilustración 58: Superficie unida del casco y bulbo

Como se puede observar en la imagen final del casco totalmente recortado, se ha tenido que crear una superficie que uniera bulbo y casco ya que no eran totalmente iguales.

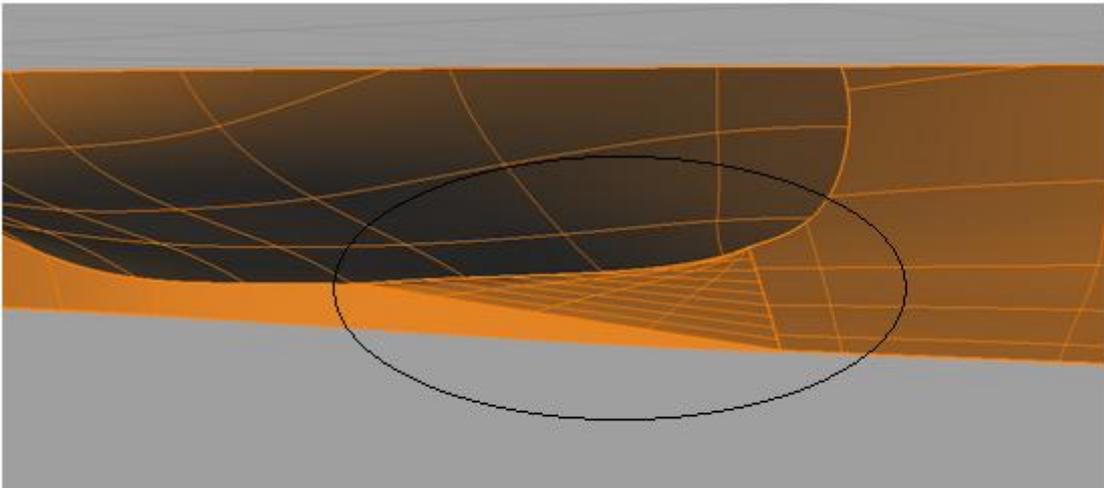


Ilustración 59: Superficie creada para la unión de bulbo y casco

Finalmente se ha creado una superficies en la parte de debajo del bulbo donde estaba abierta.

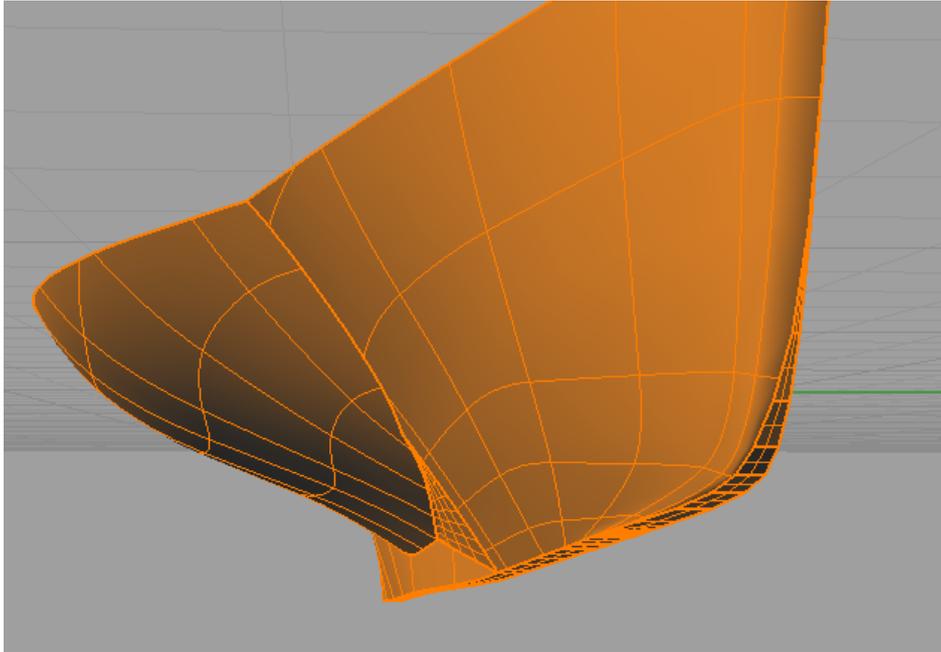


Ilustración 60: Creación de la superficie de la quilla

6.3 Análisis

Como en el caso del ejemplo del Wigley para analizar las 2 carenas se partirá de la base, de que primero hay que seleccionar el tipo de problema en el menú Start Data. Se seleccionará el mismo tipo de problema:

- 3D
- Fluid Flow
- Transpiration

Una vez seleccionado esto se procederá a la siguiente operación que será la de crear la geometría y el volumen de control. Los pasos a seguir serán los mismos que en el caso del Wigley, solo hay que tener en cuenta que la carena del buque utilizada aquí tiene una eslora de 18m, una semimanga de 2,70m y un calado de 1,97m por lo que el volumen de control creado será mayor que en el ejemplo.

Hay que crear un volumen de control lo suficientemente grande para que los límites de éste no distorsionen los resultados, pero que a su vez no sea excesivamente grande.

Los límites de la creación del volumen de control serán iguales que los explicados en el caso de Wigley. Teniendo en cuenta que el punto más a popa esta en el punto $(0,0,0)$ y que se va a llamar O, el punto A estará a una distancia de un 70% de la eslora desde O y hacia proa en la dirección del eje x. El punto B estará a una distancia de un 140% de la eslora desde O y hacia popa en la dirección del eje x. El punto C estará a una distancia de un 80% de la eslora desde A y hacia abajo en la dirección del eje Y. El punto D será igual pero desde el punto B. Finalmente, los puntos E,F,G y H estarán a una distancia de un 70% de la eslora desde los puntos A,B,C y D respectivamente y hacia la dirección negativa del eje Z.

Se importará la carena a analizar mediante un archivo IGES que previamente se habrá recortado y adecuado en el programa Rhinoceros para su correcto análisis final como se ha explicado en el apartado anterior.

Observaciones: El punto $(0,0,0)$ que se desee que tenga el archivo, es más fácil que se obtenga en el programa CAD que en el Tdyn, por lo tanto se deberá poner el punto de origen que se desee en el Tdyn cuando se este utilizando el programa Rhinoceros.

El volumen de control para este análisis quedará de la siguiente forma.

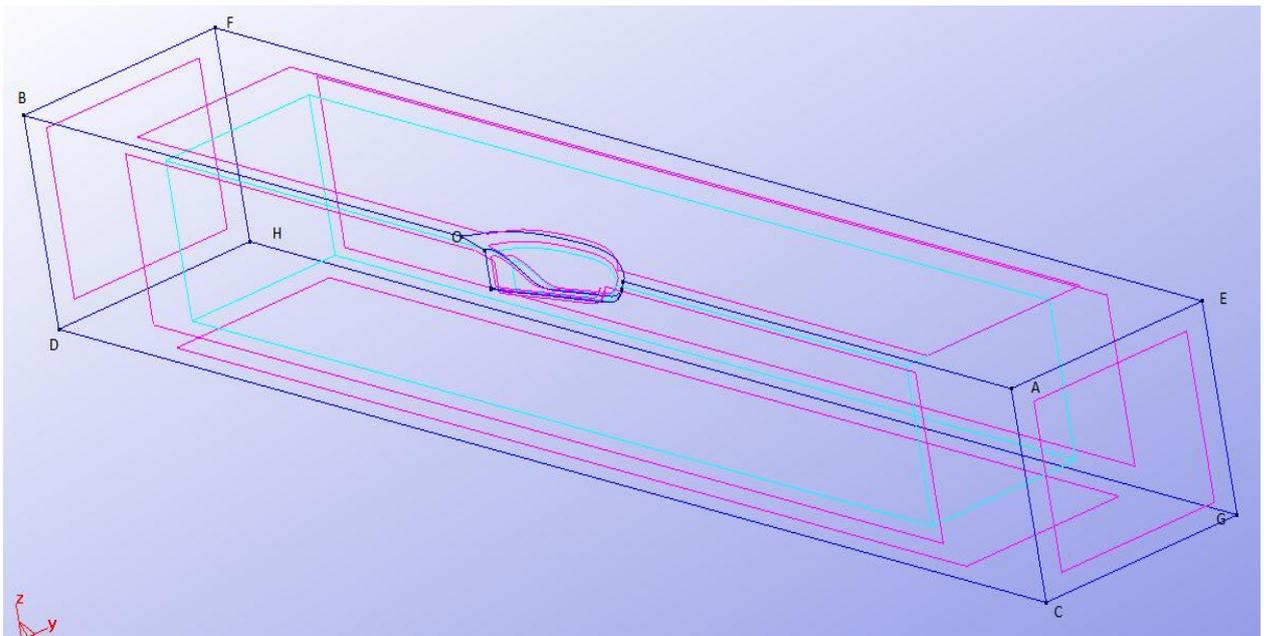


Ilustración 61: Volumen de control de la carena sin bulbo

Una vez se obtenga el volumen de control y la carena a analizar, el siguiente paso será la definición de los datos necesarios para el cálculo del problema, es decir, de las condiciones de contorno.

6.3.1 Condiciones de contorno

En el menú Data—Internal Data se modificarán los datos necesarios para este problema.

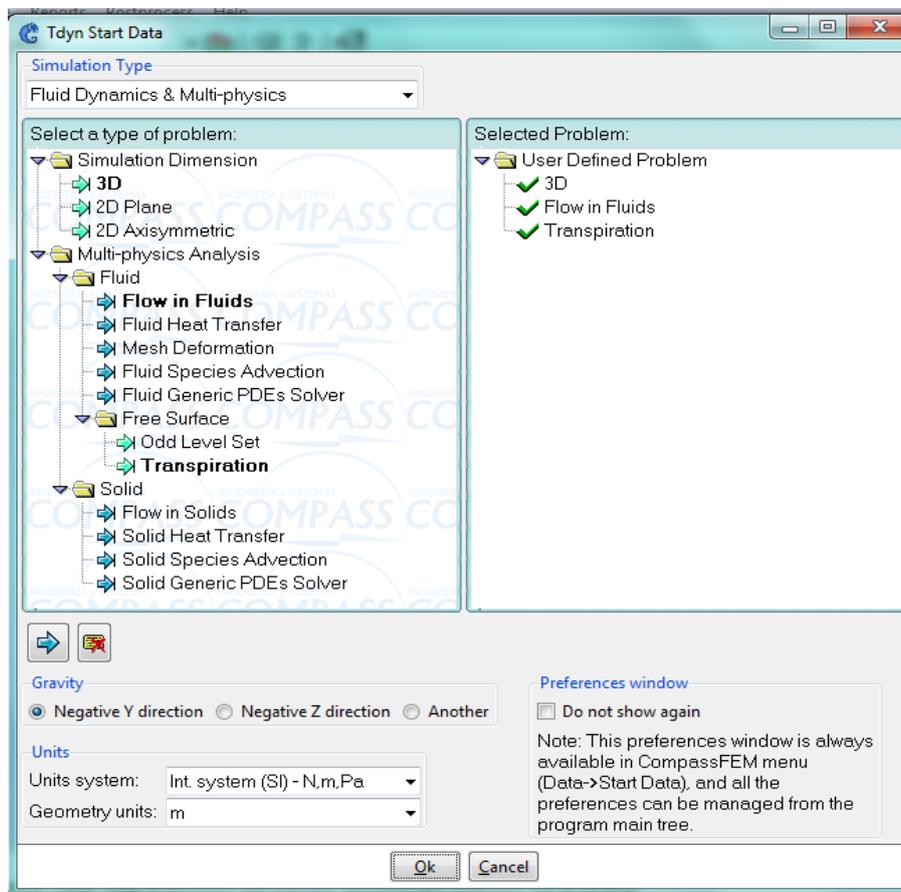


Ilustración 62: Menú Start Data

Los pasos a seguir aquí se han explicado anteriormente en el caso de Wigley por lo que solo se explicarán los datos utilizados en este análisis. Para definir las condiciones de contorno se hace en el menú Tdyn Data.

6.3.2 Datos fluid dynamics & multi-physics

La parte de análisis, se hará mediante las formulas explicadas en el caso del Wigley para el cálculo del número de pasos, el incremento de tiempo, etc. Para este caso quedará de la siguiente forma.

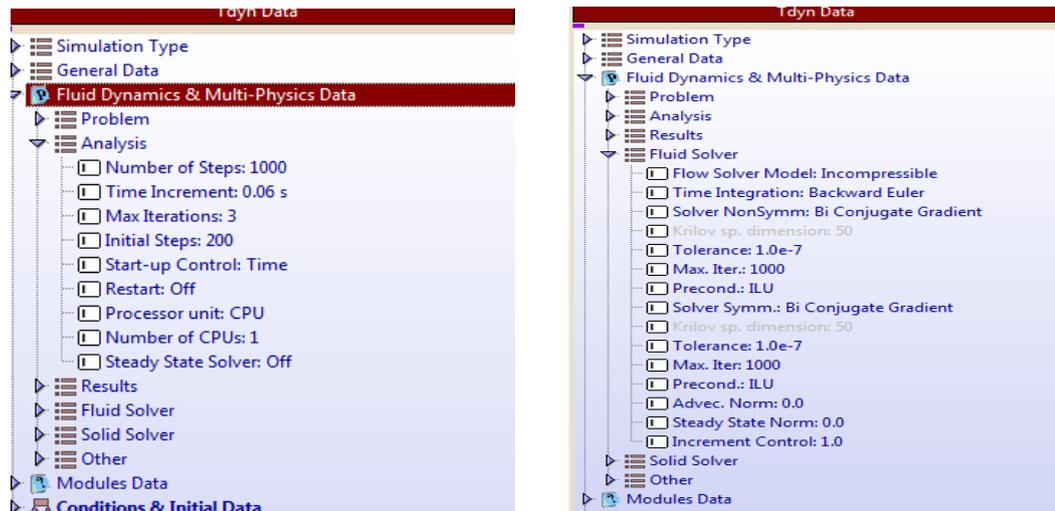


Ilustración 63: Datos del apartado fluid dynamics & multi-physics

6.3.3 Modules data

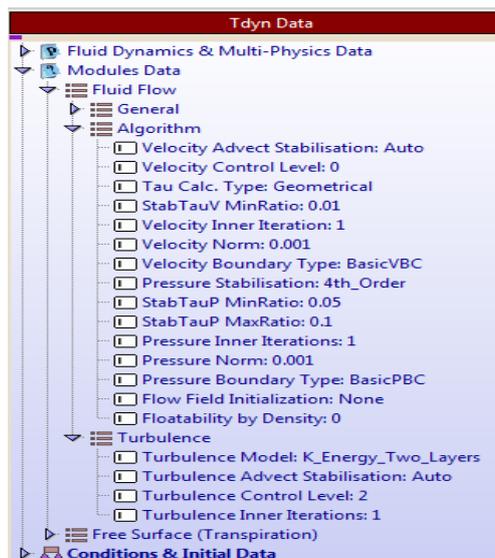


Ilustración 64: Modules Data para la carena a analizar

6.3.4 Condiciones iniciales

Se fijará la velocidad en su componente correspondiente, esto dependerá de cómo se tengan colocados los ejes, en este caso;

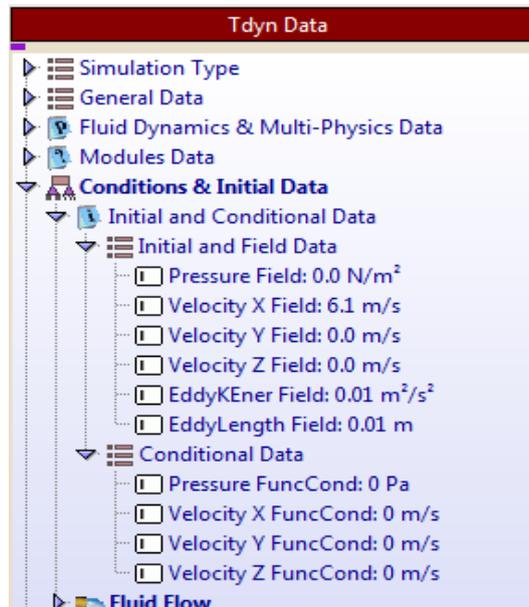


Ilustración 65: Menú de condiciones iniciales

6.3.5 Condiciones de contorno

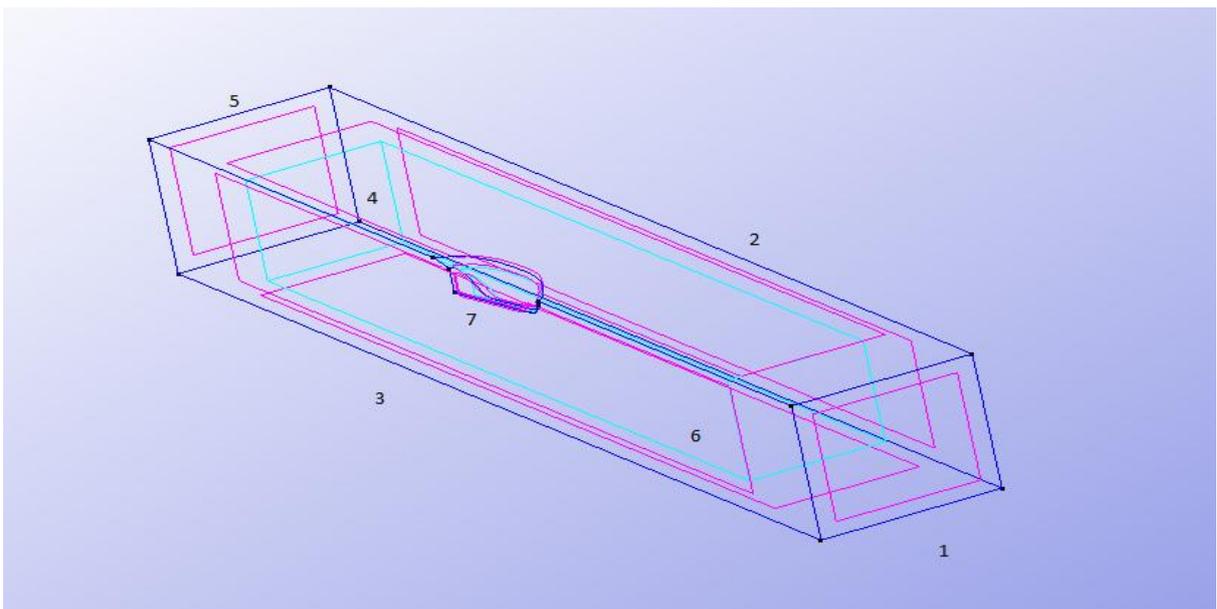


Ilustración 66: Condiciones de contorno de la carena a analizar

Las condiciones de contorno se aplicaran en todas las entidades, es decir, en puntos, líneas, superficies y volúmenes.

- Wall/Bodies: Esta condición se aplicara al cuerpo del buque, es decir a la superficie 7. Utilizando el ITTC Wall como “boundary type”.

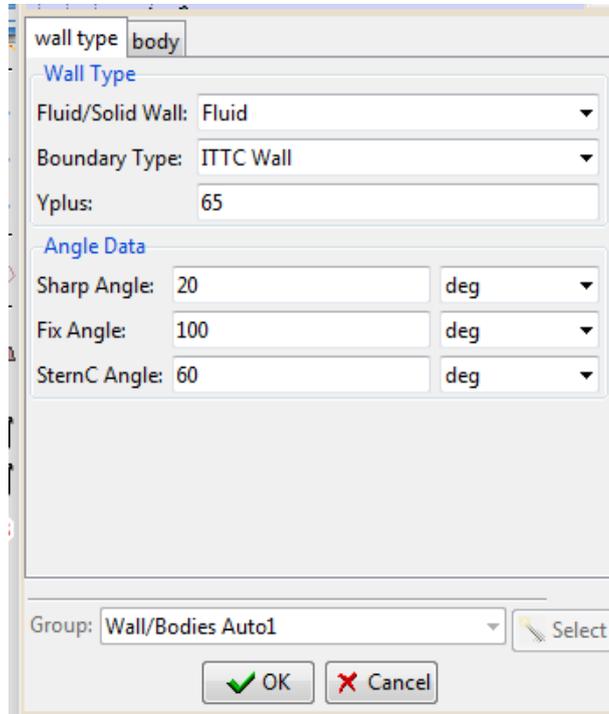


Ilustración 67: Menú Wall type

- Pressure Field: Esta condición se aplicara a la superficie 5 y se dejara como Fix Field.

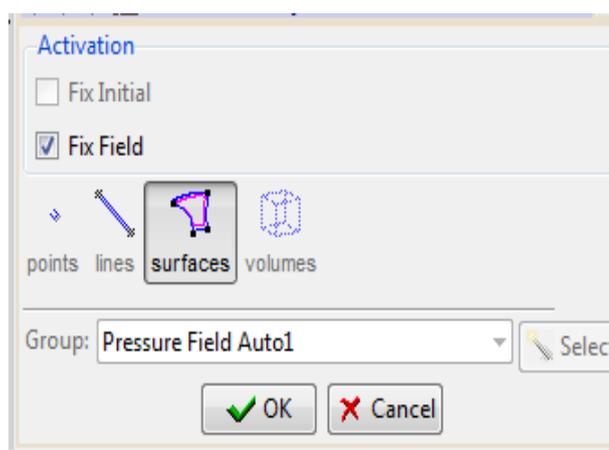


Ilustración 68: Menú Pressure Field

- Velocity Field: Esta condición se aplicara a las superficies 1,2,3,6. Dependiendo del la componente se dejara fijada una condición.

Para la superficie 1 se dejara fijado Fix X, para la 2 y 3 se dejara Fix Y y para la superficie 6, Fix Z

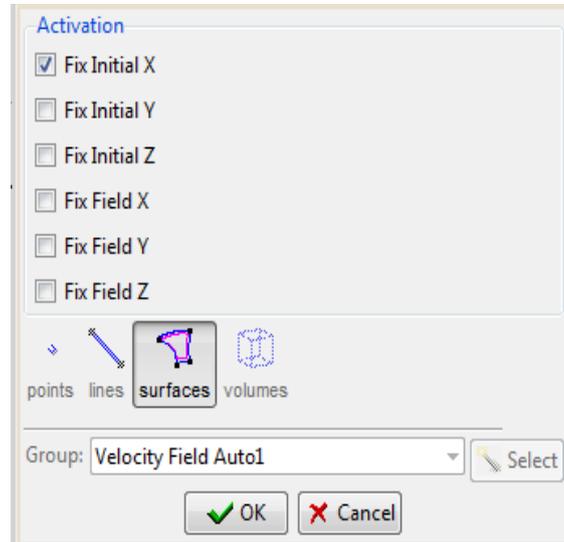


Ilustración 69: Menú Velocity Field

- Free Surface: Se fijara esta condición para la superficie 4. Se elegirá Adams Bashforth 2 como Time Integration y la lengthn será en este caso la eslora del casco a analizar.

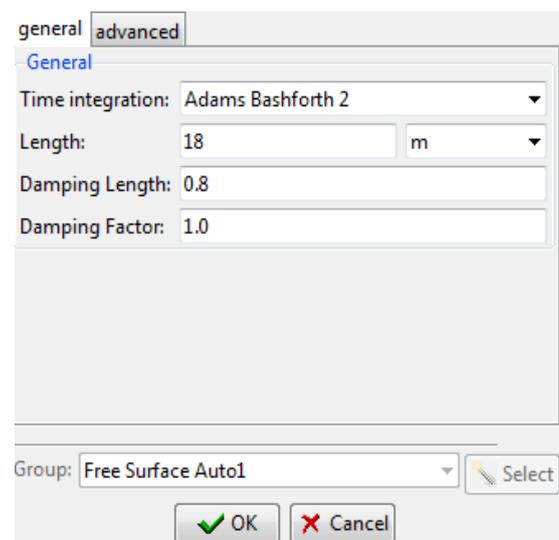


Ilustración 70: Menú Velocity Field

6.3.6 Materiales

En Fluid, se aplicará esta condición a todo el volumen de control, y se seleccionará agua de mar.

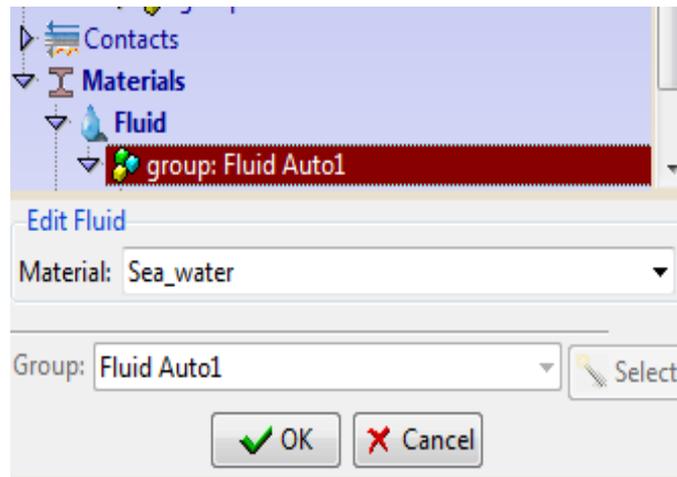


Ilustración 71: Selección de material

6.3.7 Generación de malla

La malla se creara de forma que sea bastante tupida para la obtención de unos buenos resultados.

Como lo que se pretende es buscar los resultados en el casco, lo que se hará será hacer una malla mas tupida en el casco que en el resto del volumen. Para ello se seleccionara la herramienta “Unstructured mesh” en el menú de Mesh. Se dará un valor de 0,1 al casco, de 0,3 a la superficie libre y de 1 al volumen.

Una vez hecho esto se generara la malla. Aparecerá un cuadro donde se pondrán los siguientes valores.

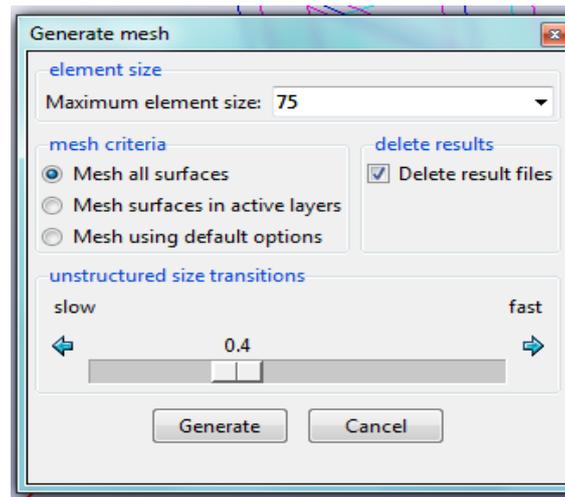


Ilustración 72: Menú generación de malla

Con esta configuración de malla aplicada a cada uno de los modelos a estudiar se obtienen los siguientes elementos para cada uno:

Barco sin bulbo:

Elementos Triangulares: 28768

Elementos Tetraedro: 183905

Nodos: 38641

Barco con bulbo

Elementos Triangulares: 34912

Elementos Tetraedro: 220150

Nodos: 46073

6.3.8 Cálculo

Solo queda ir al menú y utilizar la herramienta de “Calculate”. Este proceso puede tener una duración de varias horas. Cuando termine se podrán visualizar los resultados obtenidos.

7 Resultados

A continuación se expondrán los resultados obtenidos, primero de la carena sin bulbo y a continuación los de la carena con el bulbo. Los dos resultados están analizados para una velocidad de 6,1 m/s (11,85 nudos) y un $Fr = 0,458$.

Los resultados se presentaran de la siguiente forma:

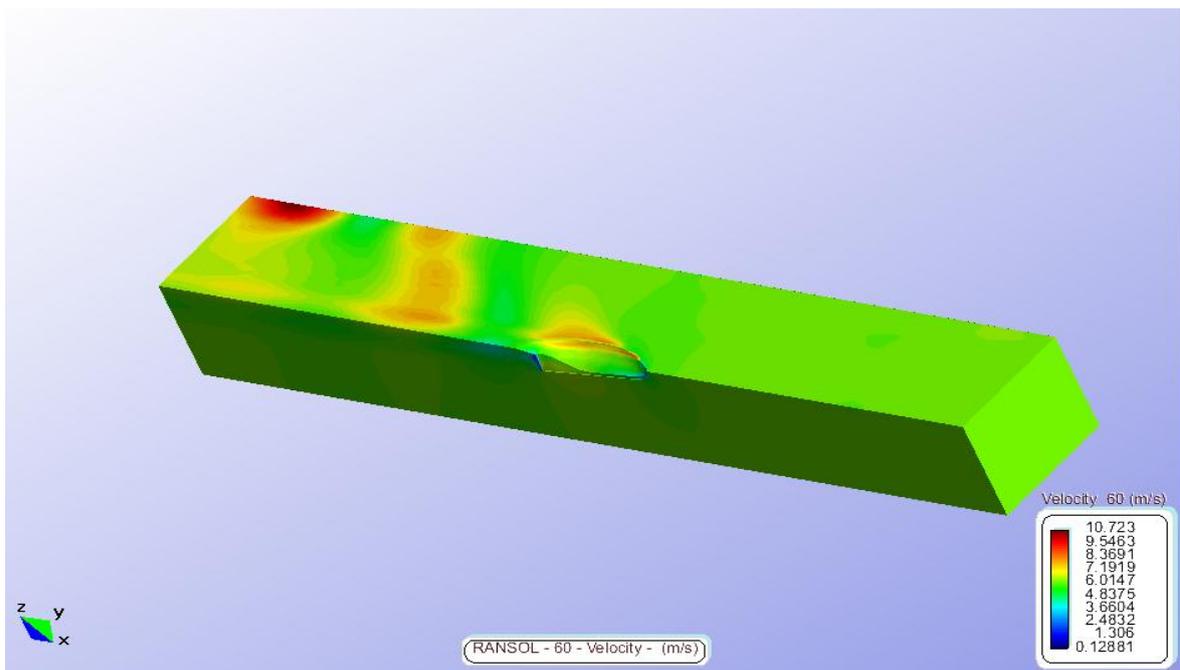
- 7.1 Resultados carena sin bulbo.
- 7.2 Resultados carena con bulbo.
- 7.3 Comparación de los resultados.

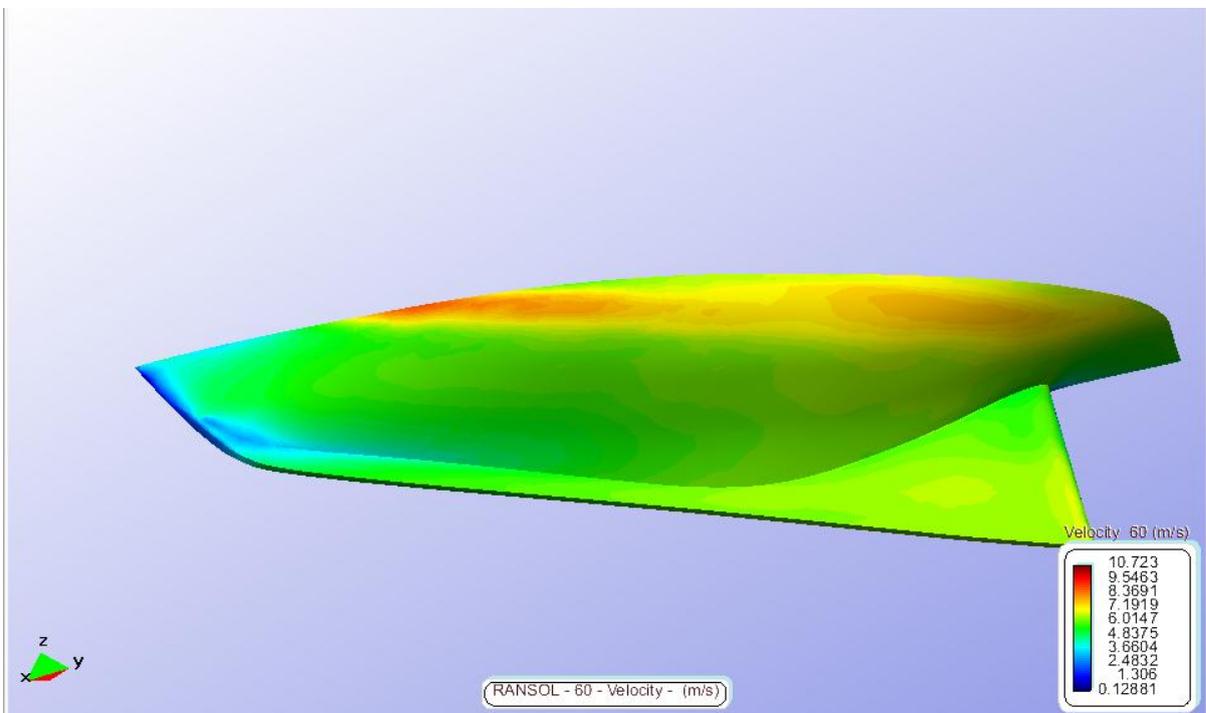
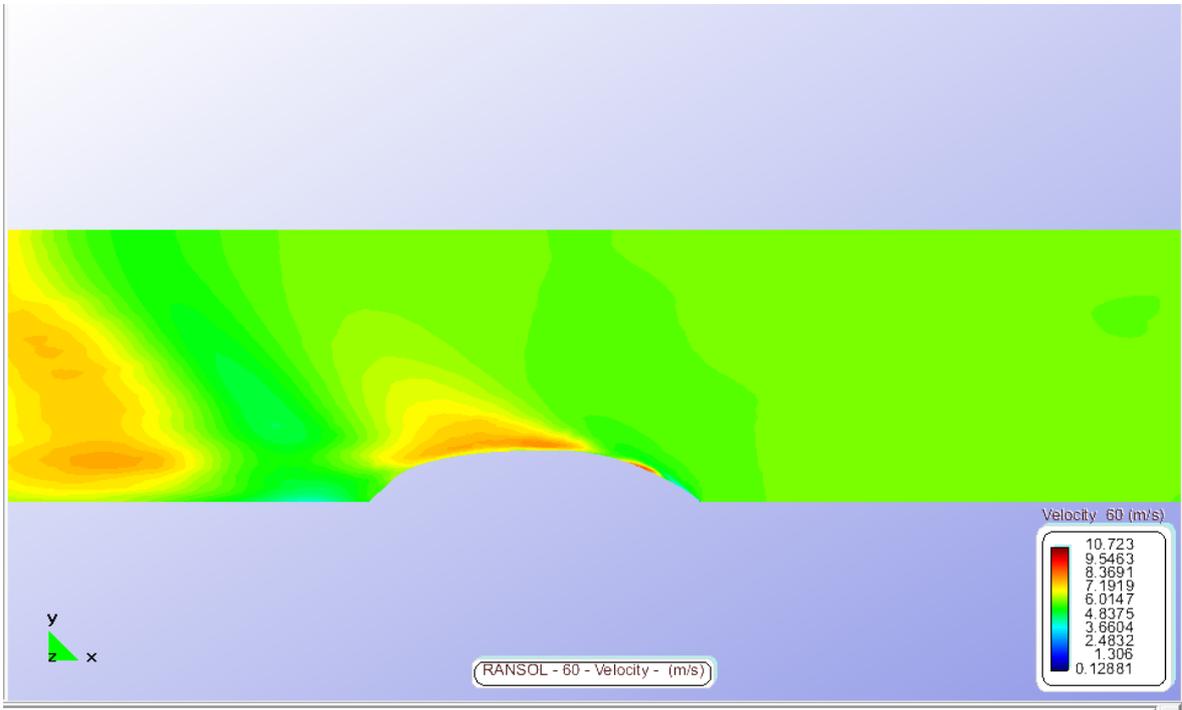
En ambos casos se incluyen las vistas de la distribución de velocidades (m/s), distribución de presiones (Pa), distribución y cortes de la ola (m), líneas de corriente y los resultados de fuerzas y momentos.

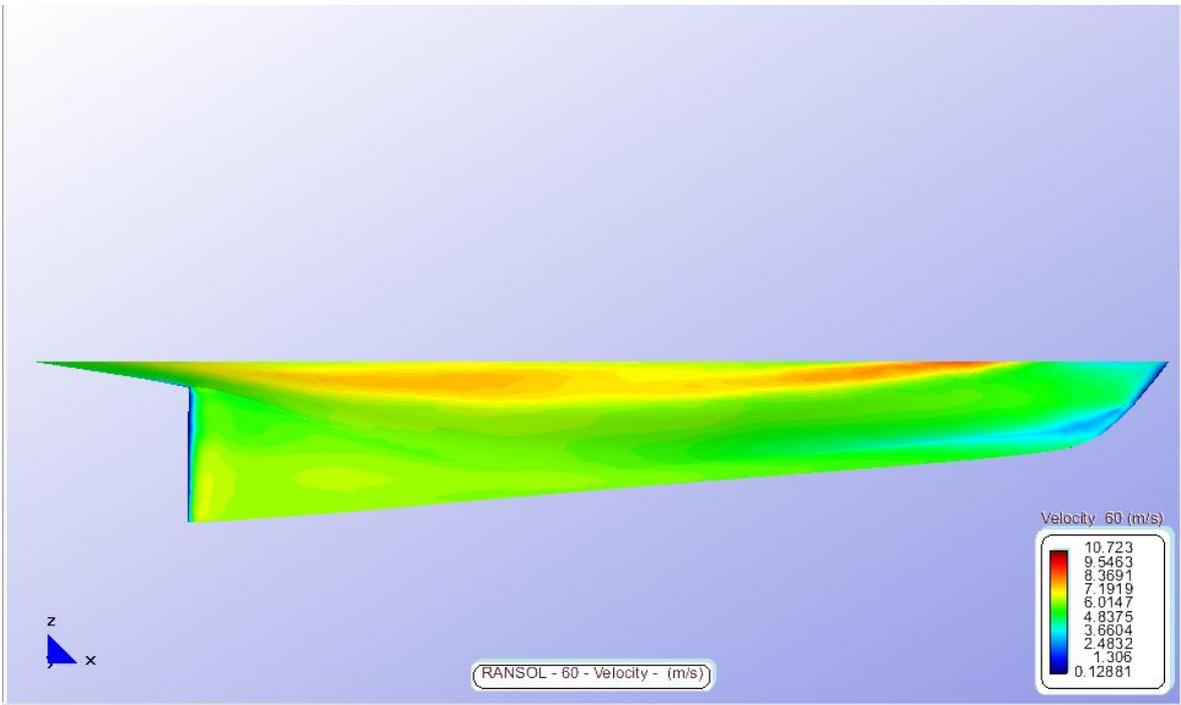
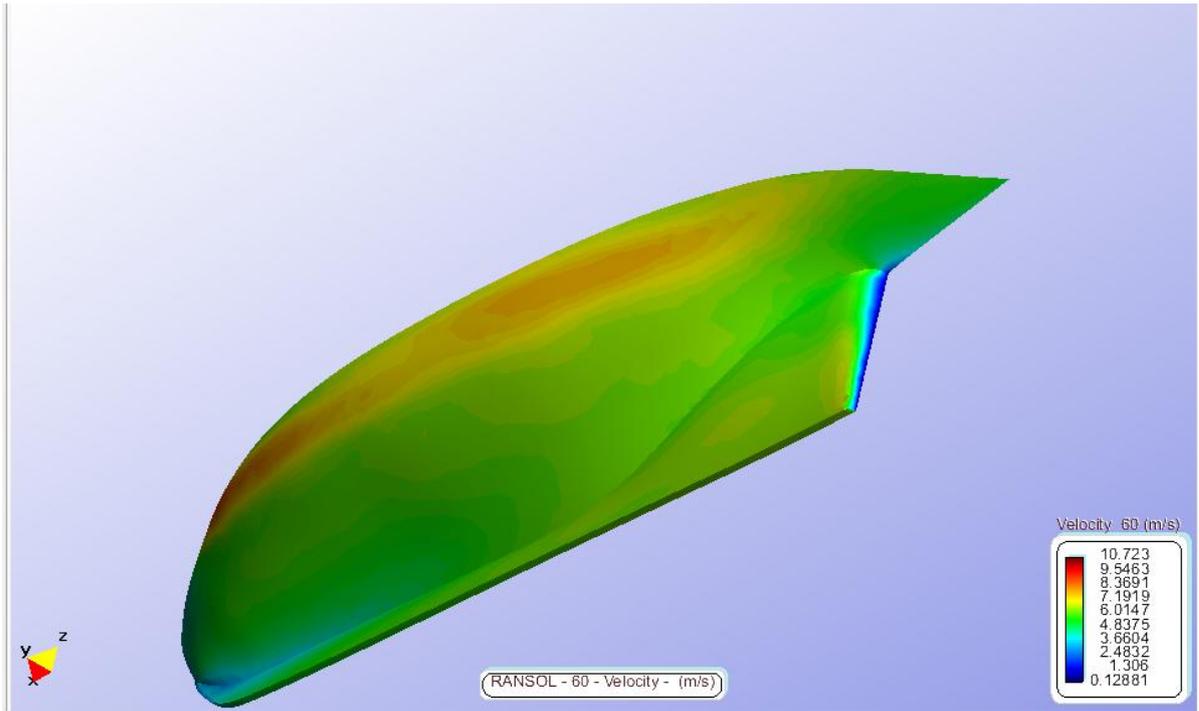
En algunas vistas se ponen varias imágenes de cada distribución para una mejor apreciación de los resultados.

7.1 Resultados de la carena sin bulbo

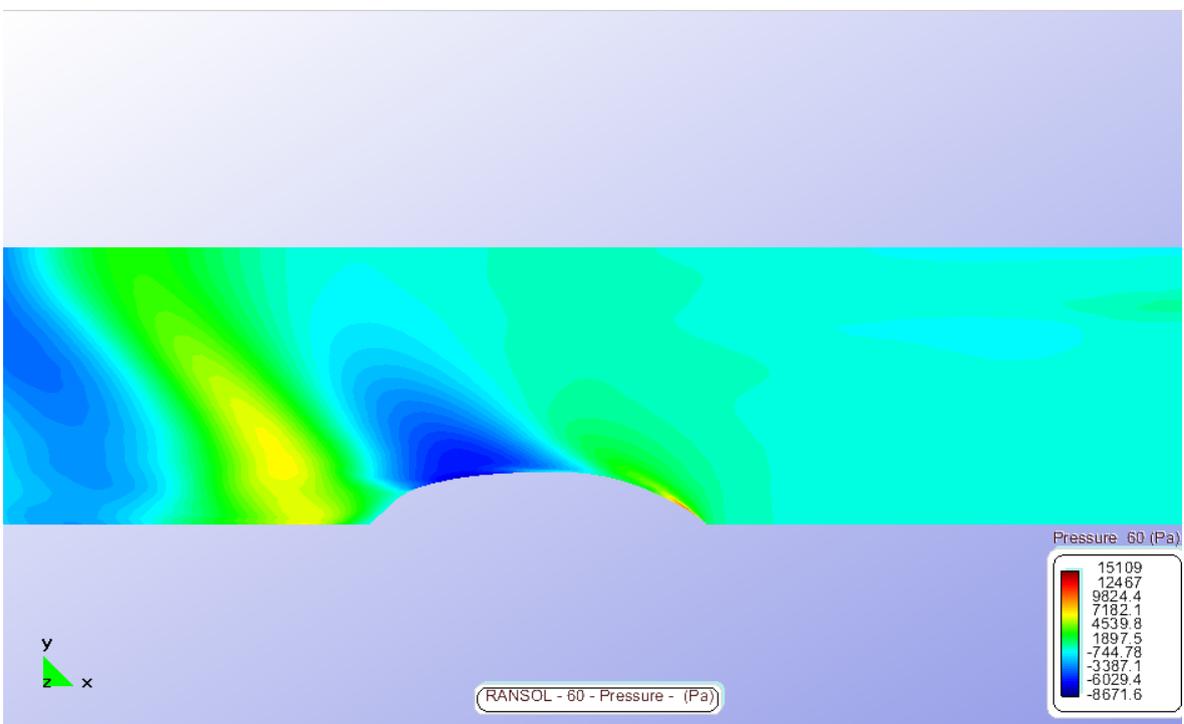
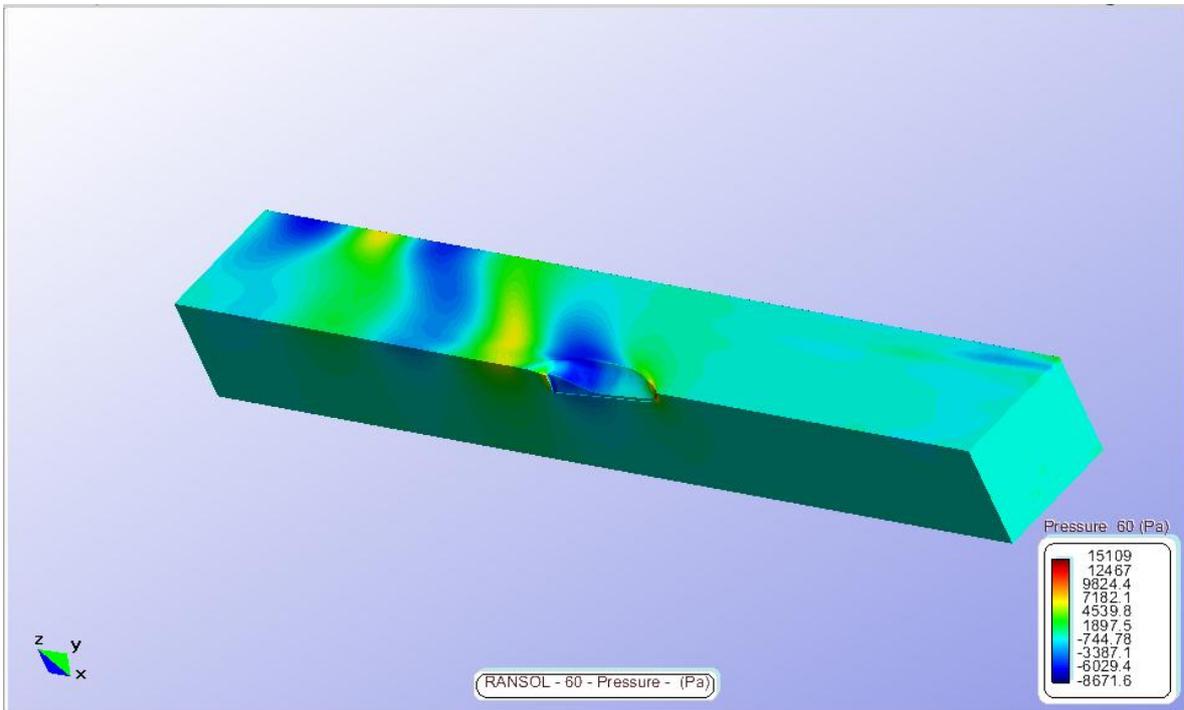
- Distribución de velocidades (m/s)

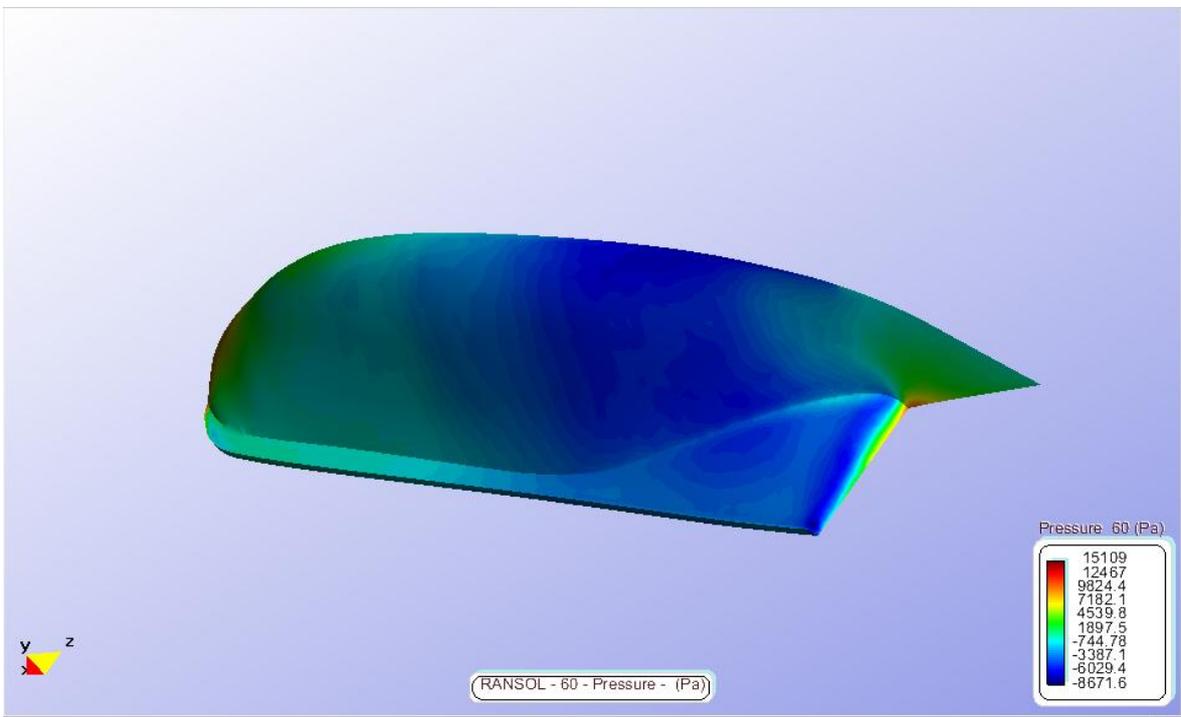
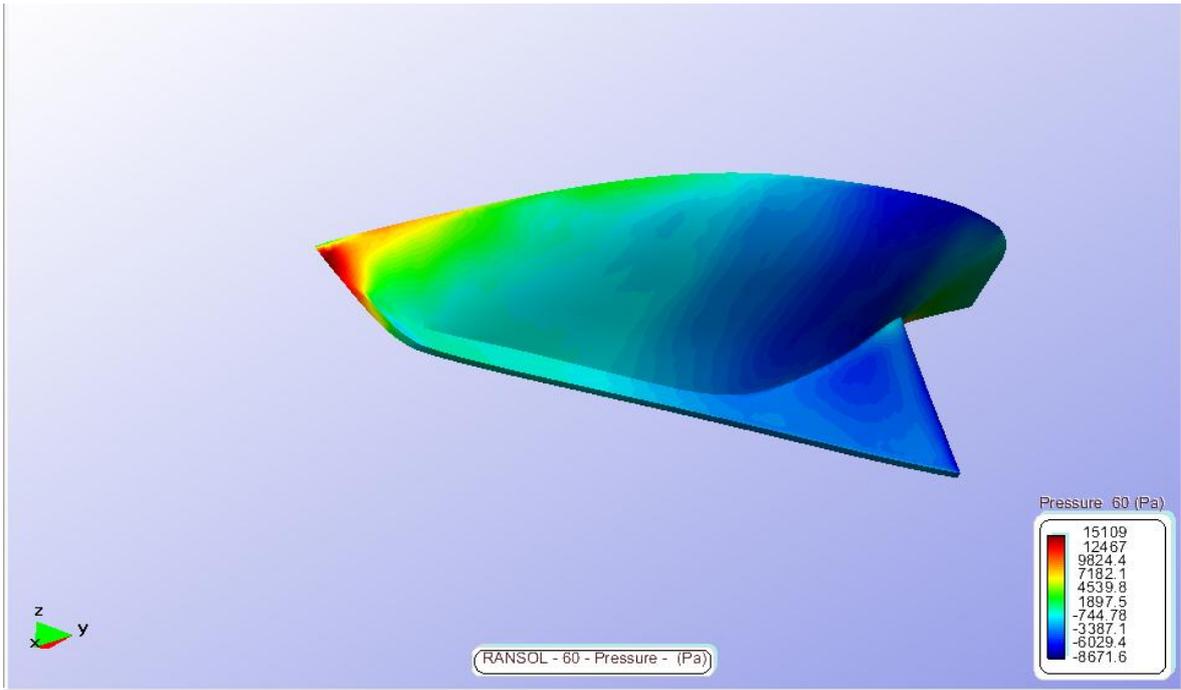


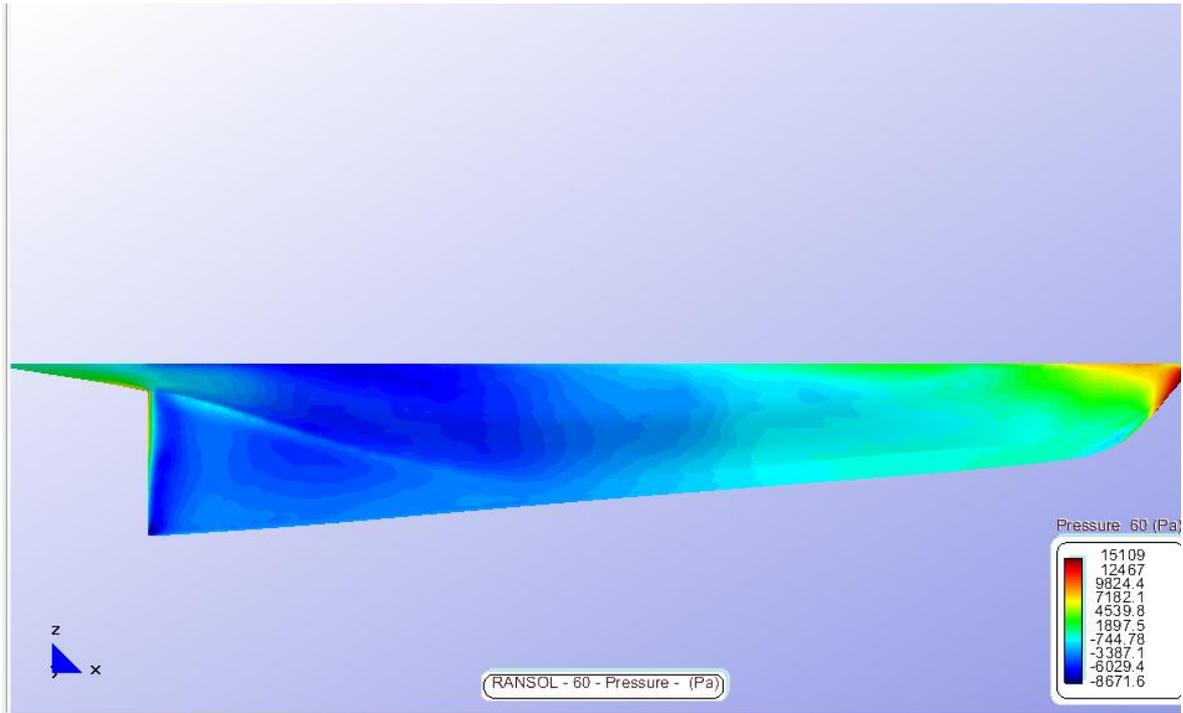




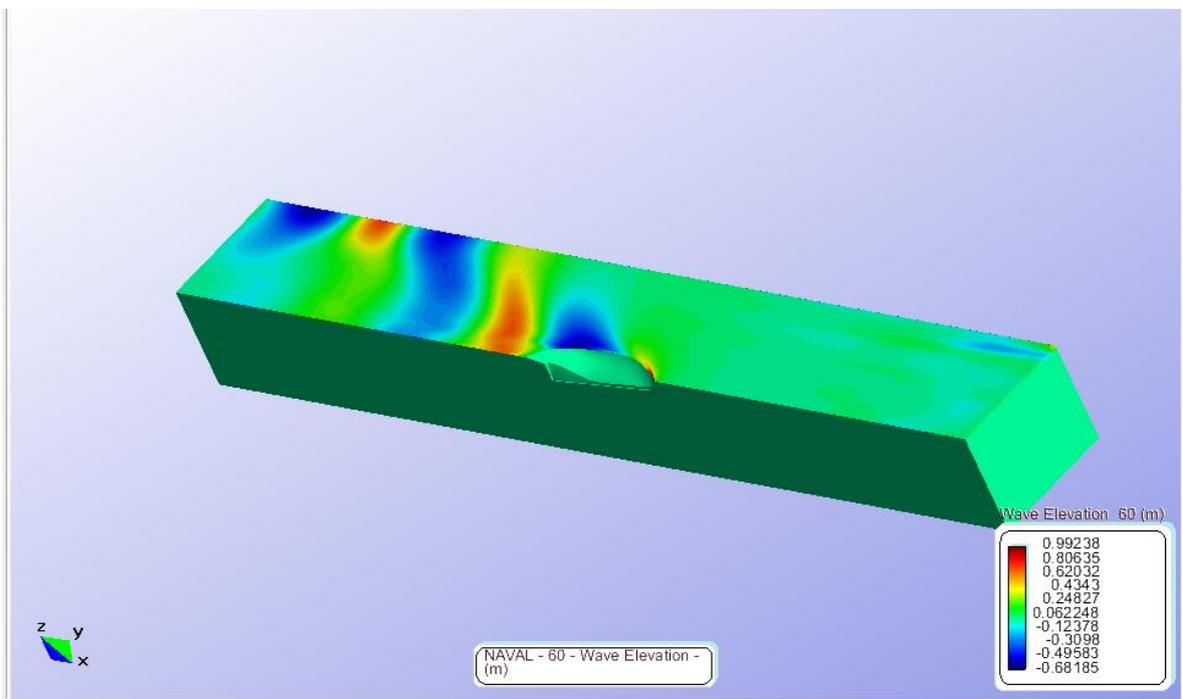
- Distribución de presiones (Pa)

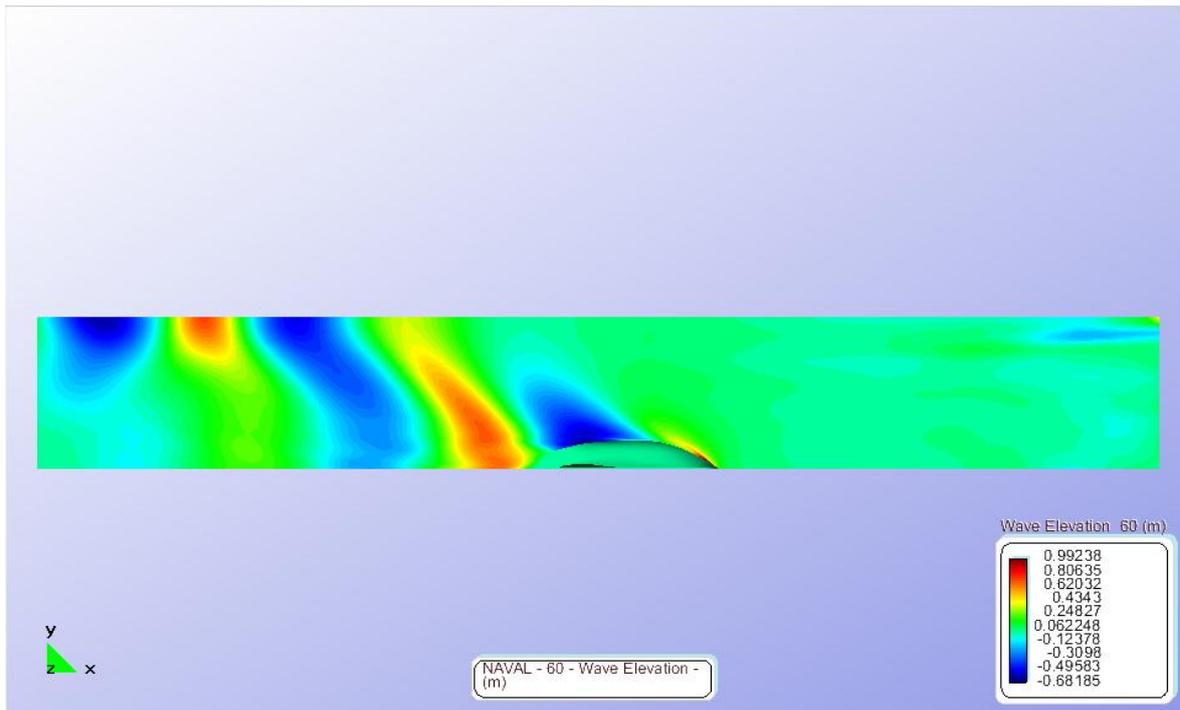






- Distribución elevación de ola (m)



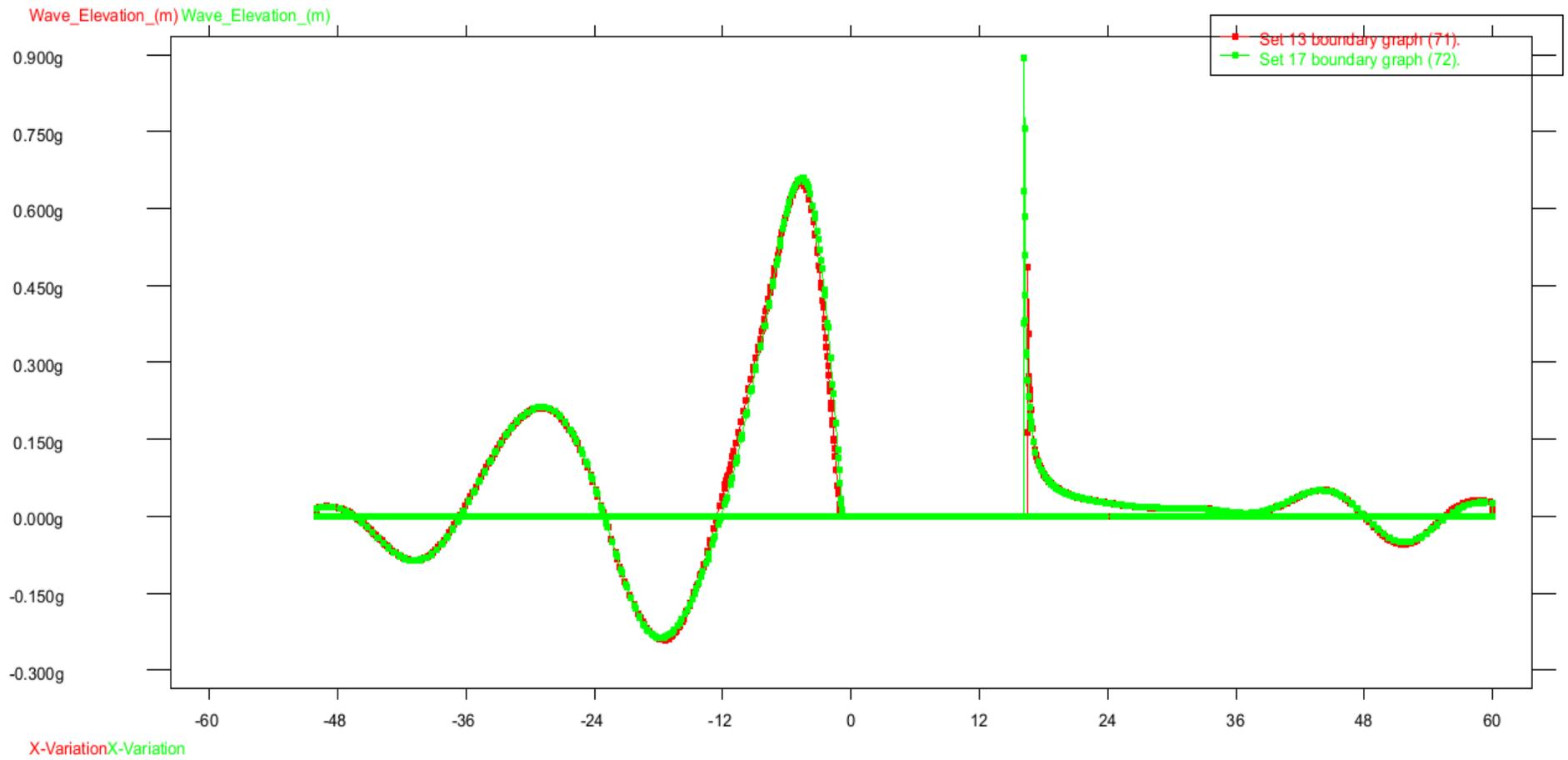


- Cortes elevación de ola (m)

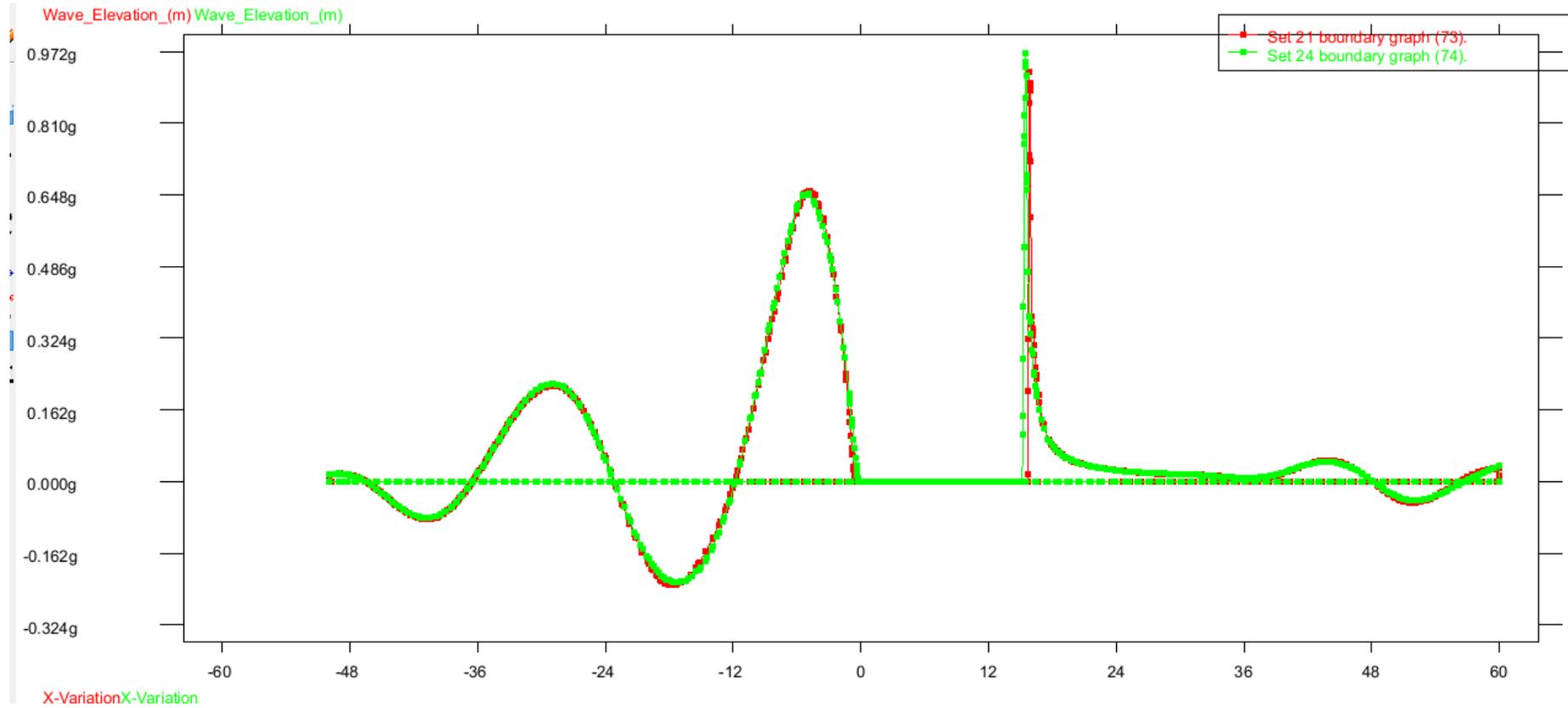
Los cortes de la ola se realizan desde crujía con un intervalo de distancia de $0,25B$ (B se refiere a la semimanga) hasta B , a partir de ahí los cortes se realizan con un intervalo B , hasta $9B$, estos cortes son comunes para cada uno de los modelos.

En la representación gráfica de los cortes de la olas, en el eje de las ordenadas se tiene el valor de la altura de la ola en metros y en el eje de las abscisas está representada la longitud del volumen de control.

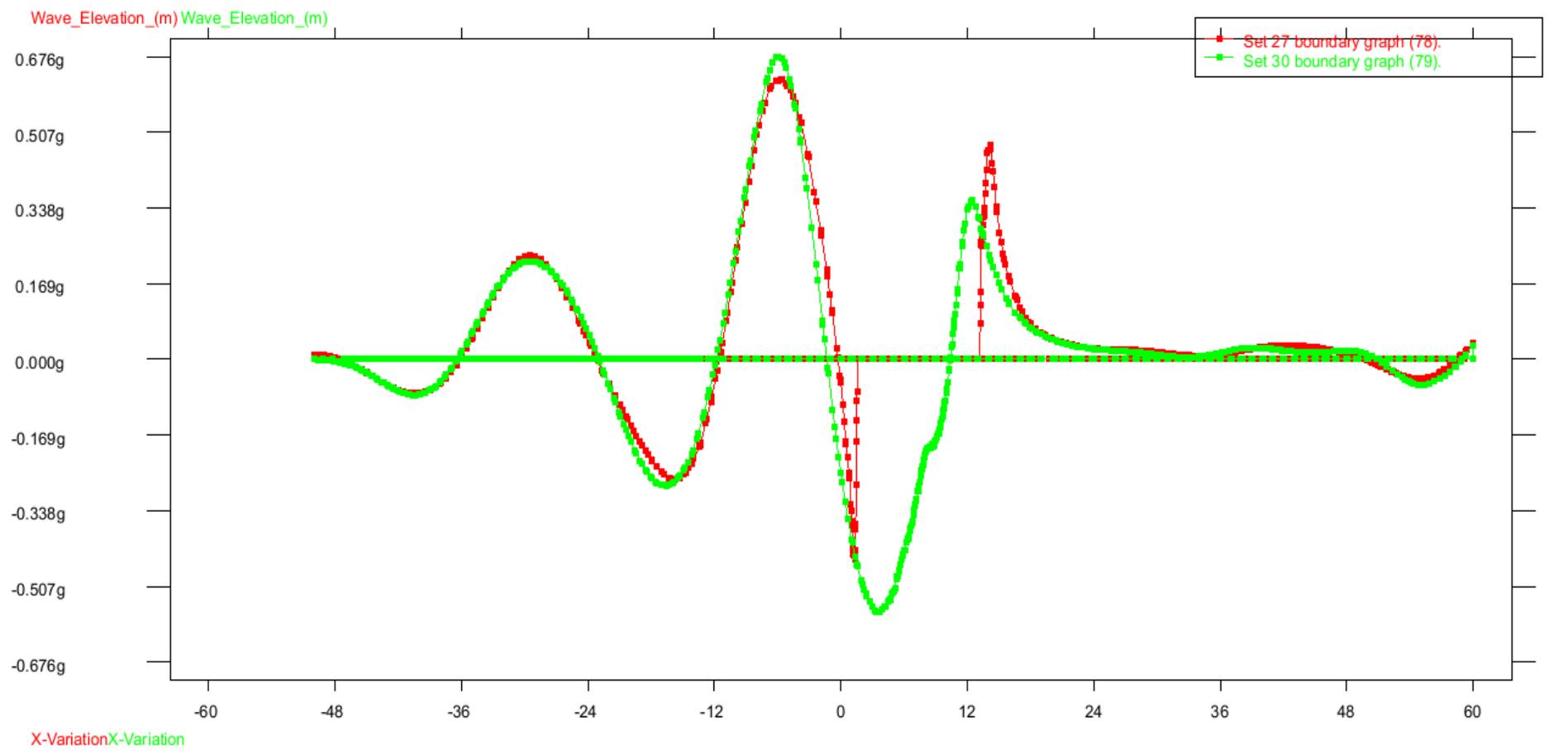
0,25B y 0,5B



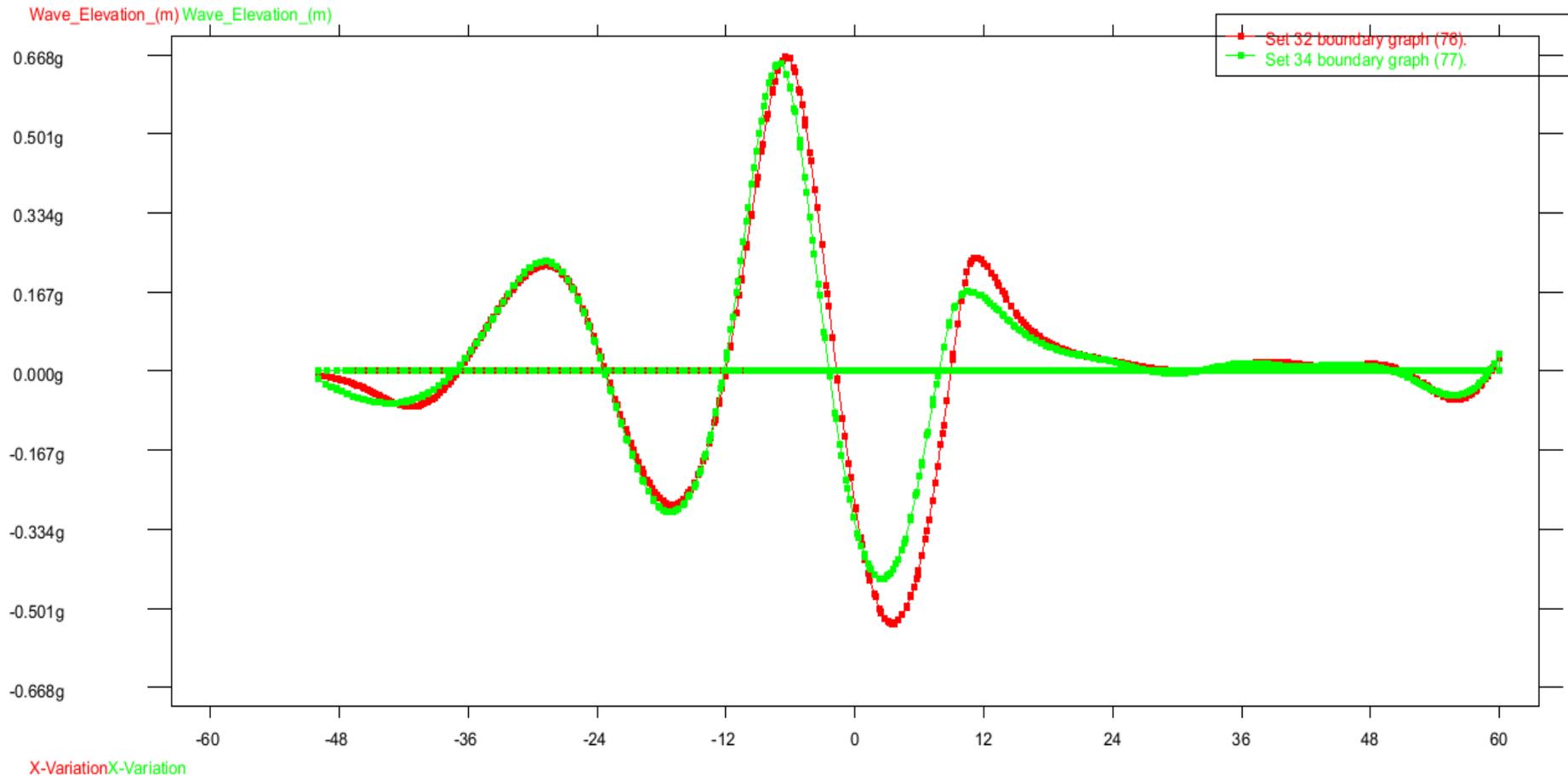
0,75B y 1B



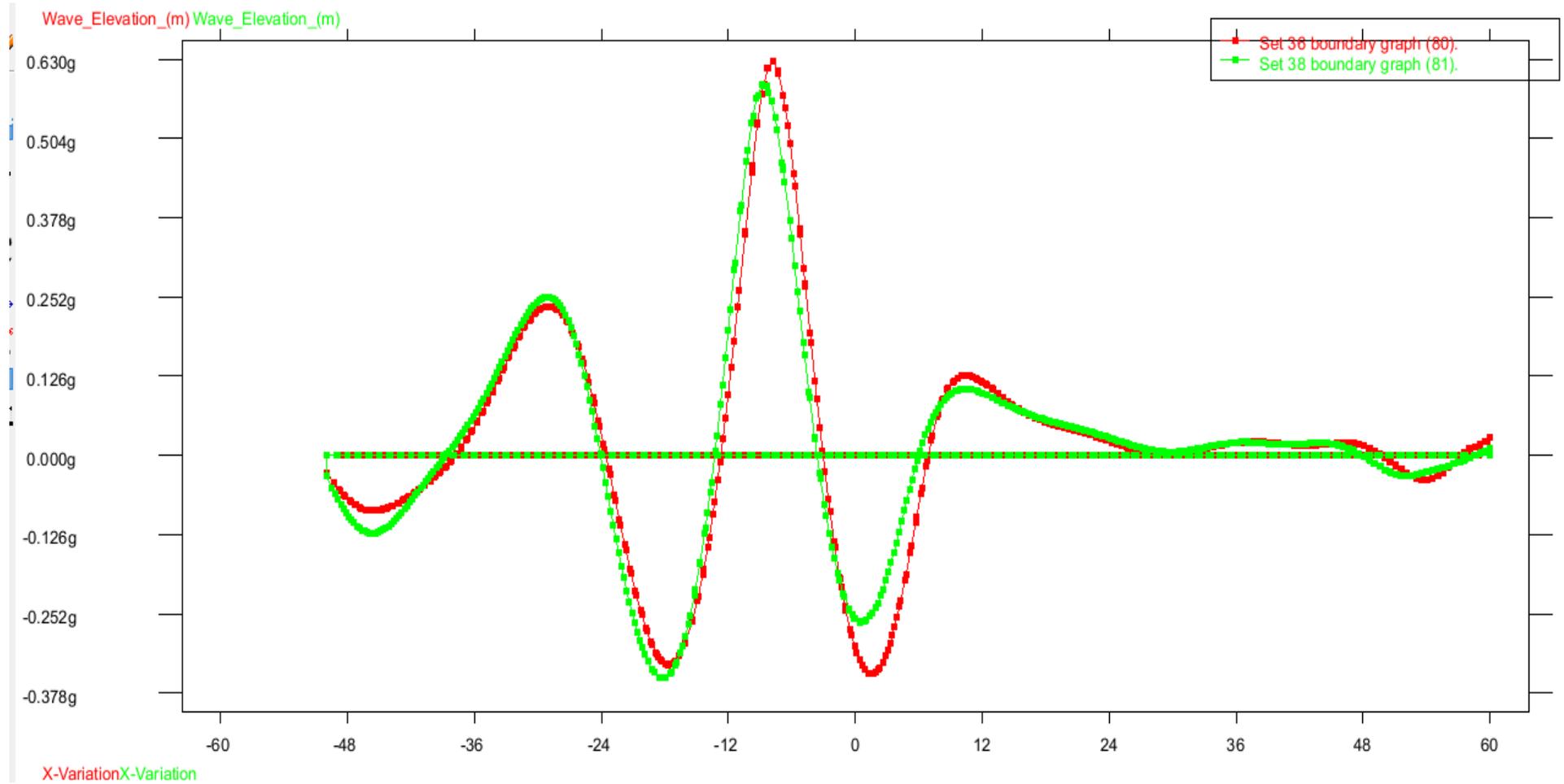
2B y 3B



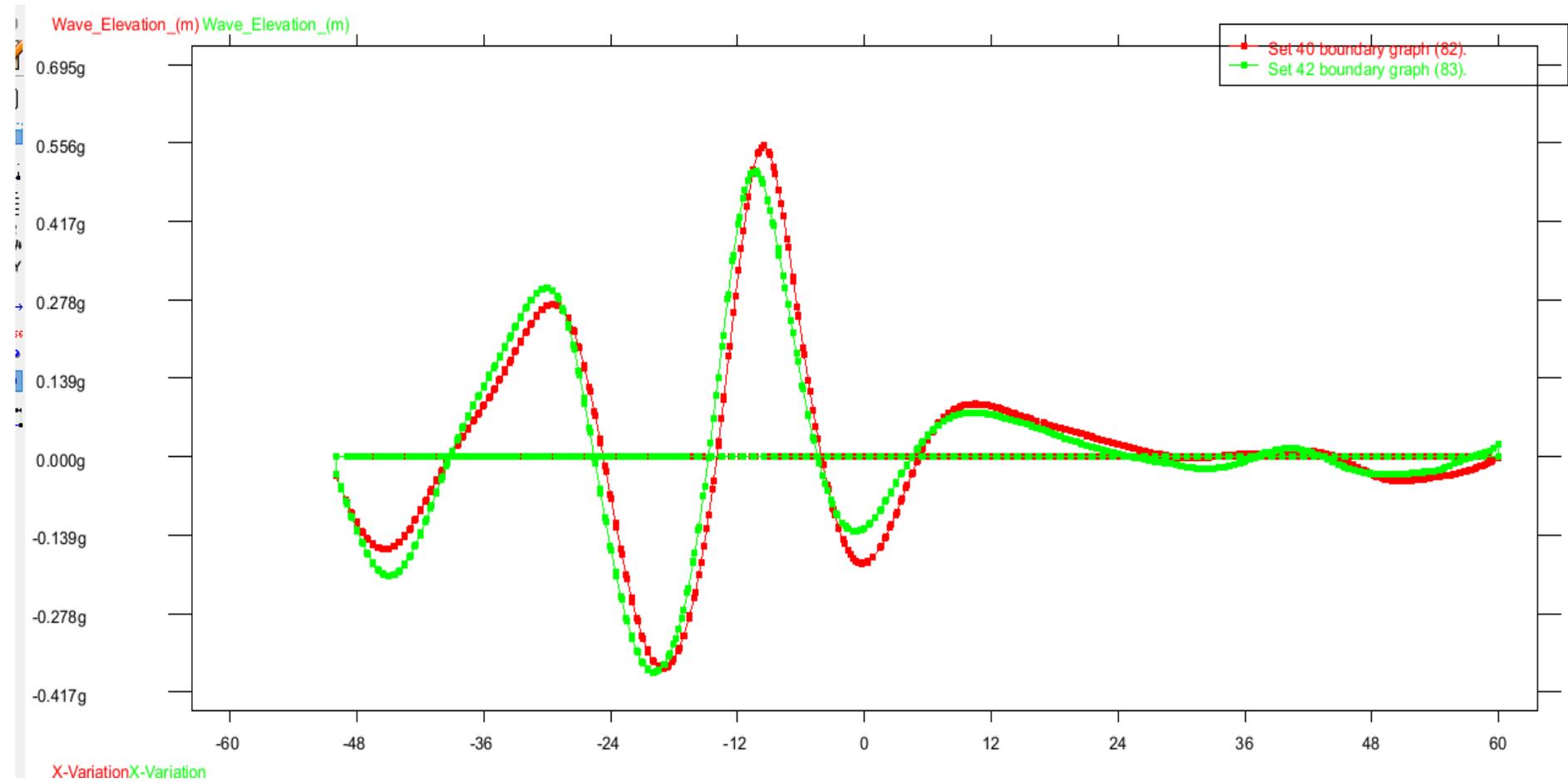
4B y 5B



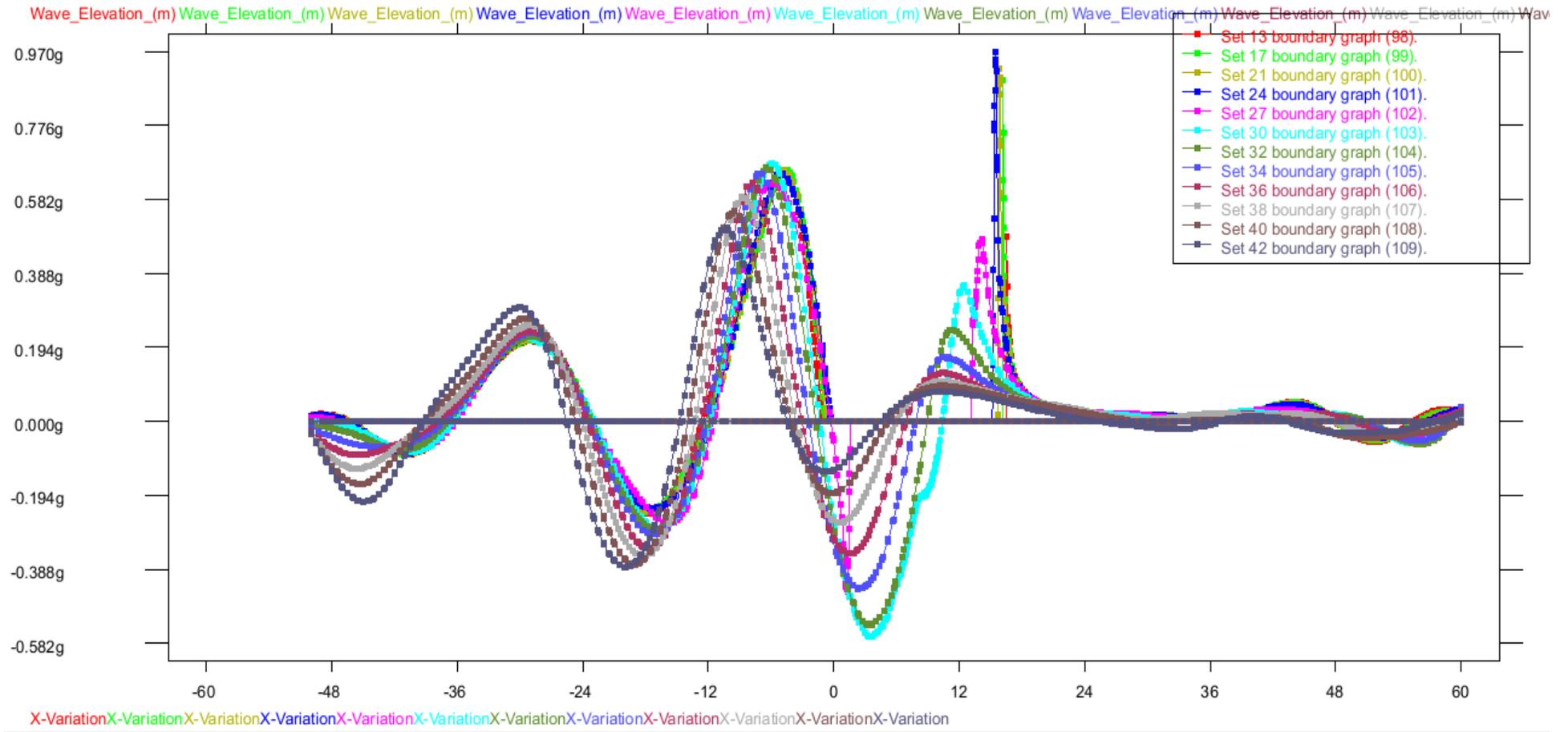
6B y 7B



8B y 9B

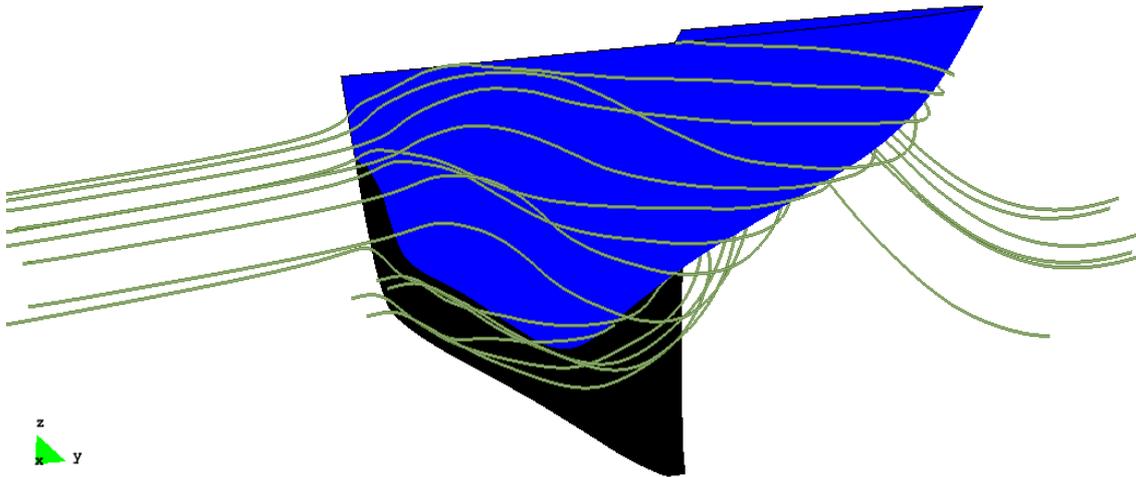


Todas



- Distribución de las líneas de corriente.

Hay una herramienta que permite visualizar las líneas de corriente. El resultado es el siguiente.



- Resultado de fuerzas y momentos

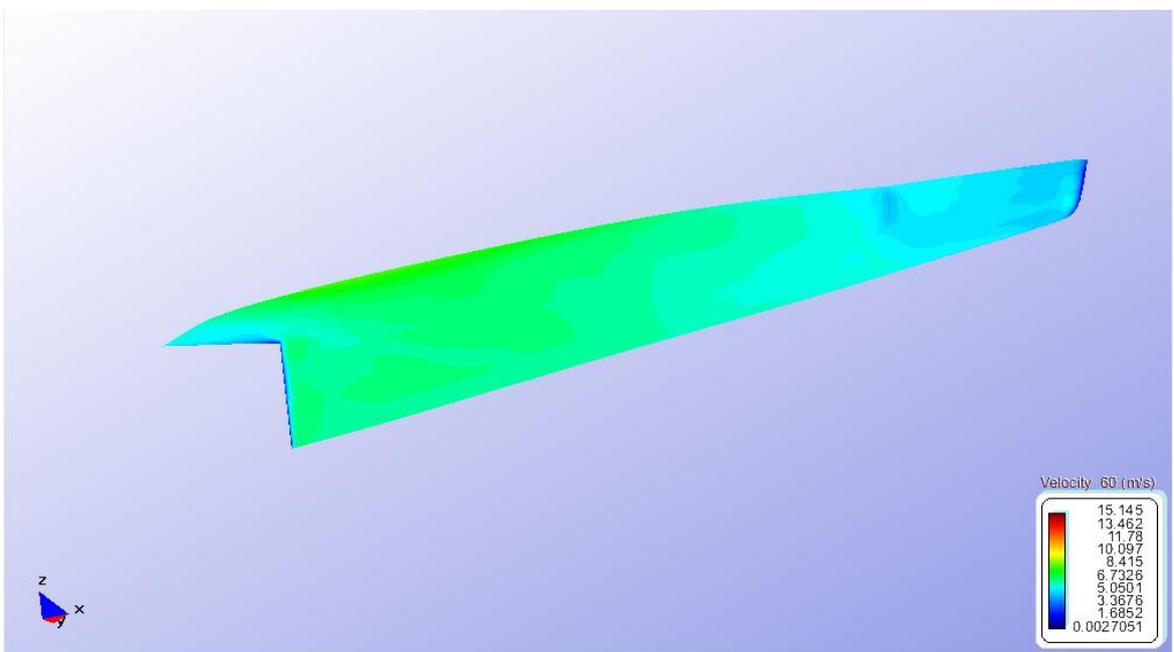
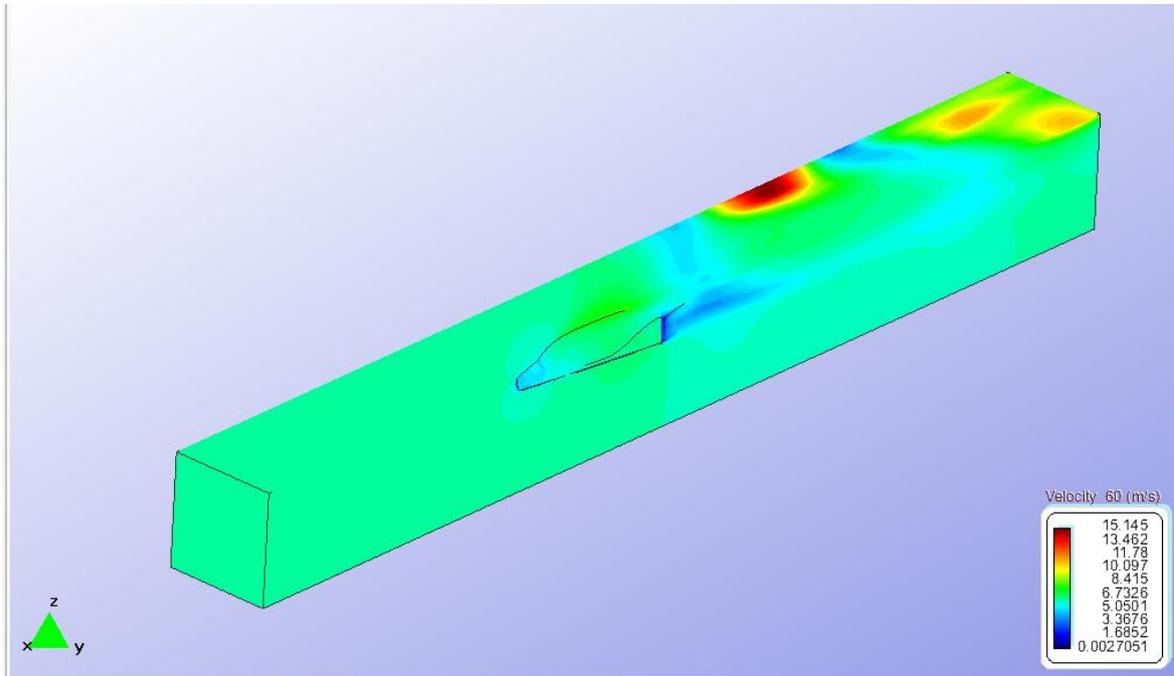
```

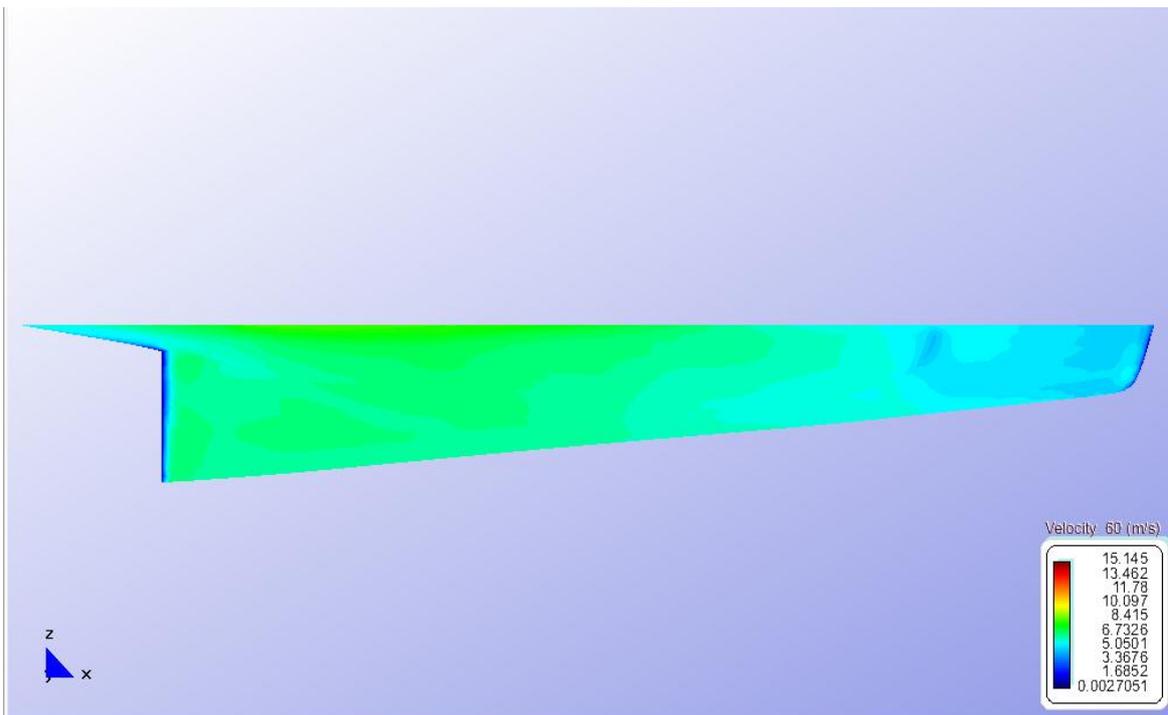
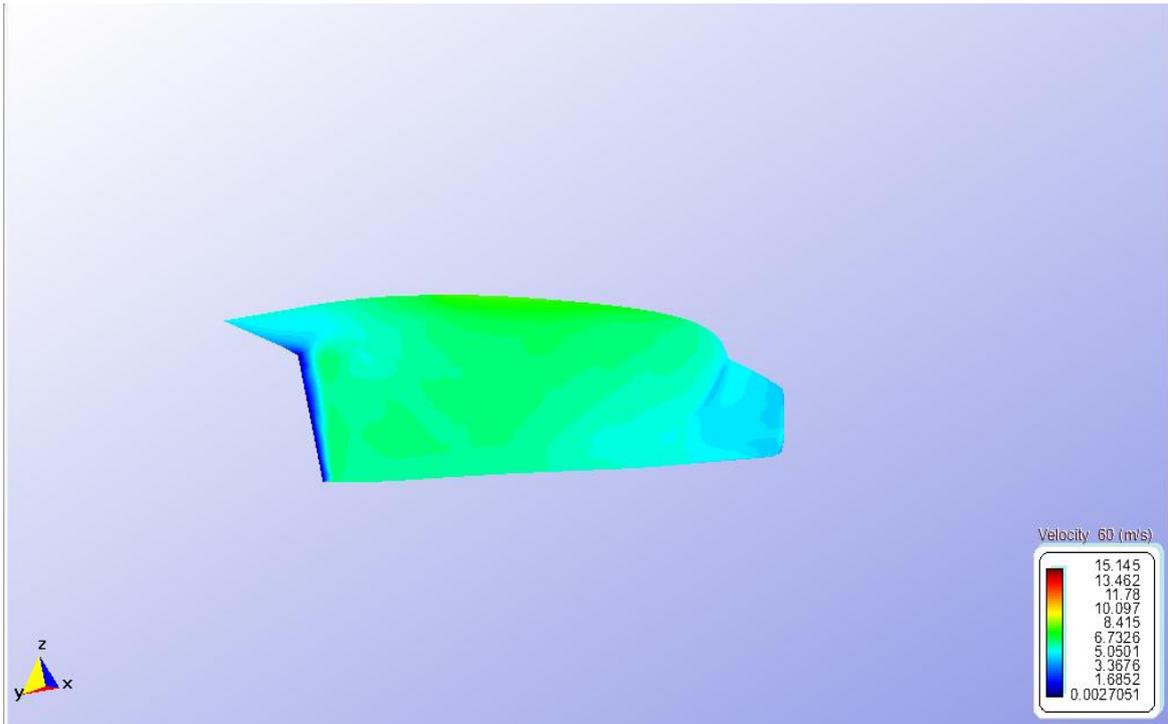
Forces on Boundaries
T3_Wall/Bodies Auto1: (Final step 59.85)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
-14677    64423   -74954
Pressure Moments (PMx PMy PMz)
-1.6249e+005  3.3881e+005  2.3622e+005
Static Pressure Forces (SPx SPy SPz)
-0.030056  -3.0587e+005  3.2004e+005
StaticPressure Moments (SMx SMy SMz)
4.6031e+005  -2.5503e+006  -2.1667e+006
Viscous Forces (VFx VFy VFz)
-4329.6    -37.57    74.564
Viscous Moments (VMx VMy VMz)
199.69    -4531.2   8376.7
Total Forces
-19007    -2.4148e+005  2.4516e+005
Total Moments
2.9803e+005  -2.2161e+006  -1.9221e+006
*****
*****
Note:
    Pressure Forces are calculated by integrating pressure on surface
    Static Pressure Forces are calculated by integrating static pressure on
surface
    Viscous Forces are calculated by integrating viscous stresses on surface
    Three cartesian components of forces and moments are given in both cases
Close

```

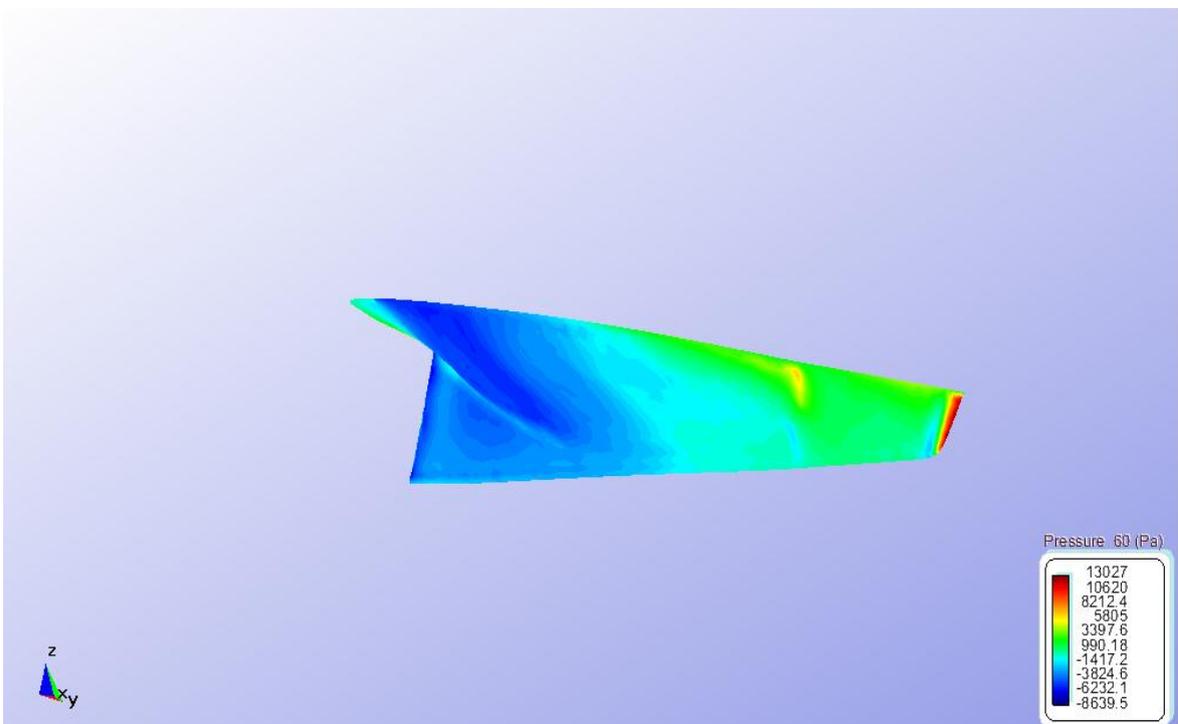
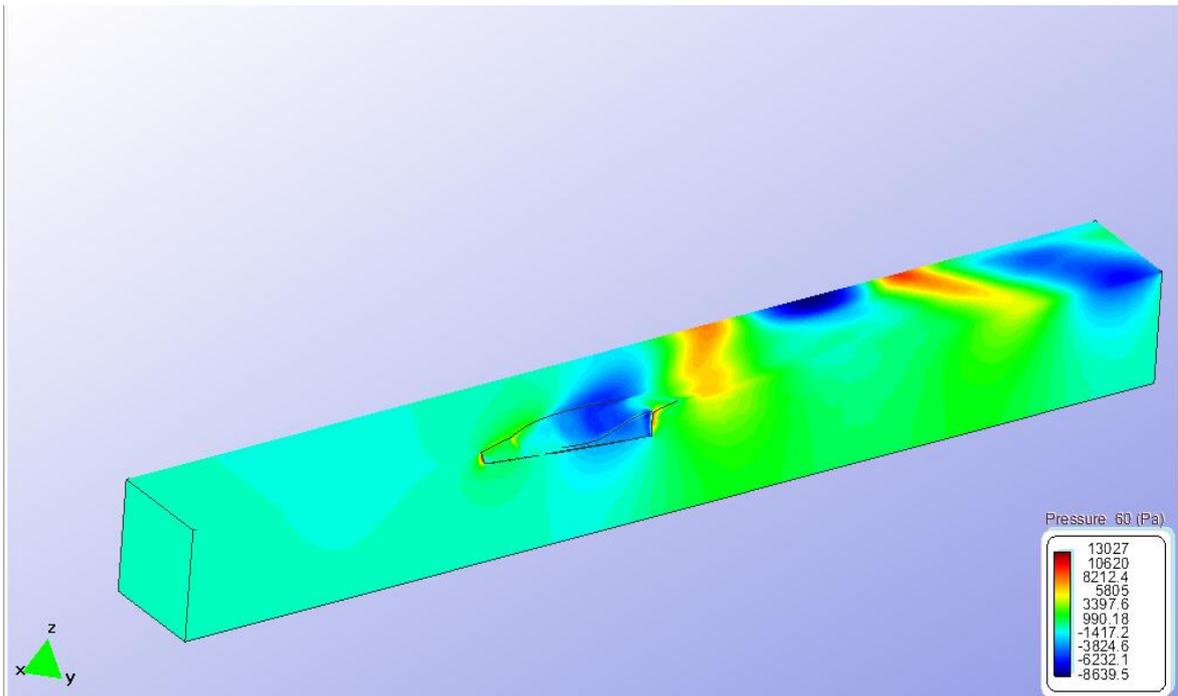
7.2 Resultados de la carena con bulbo

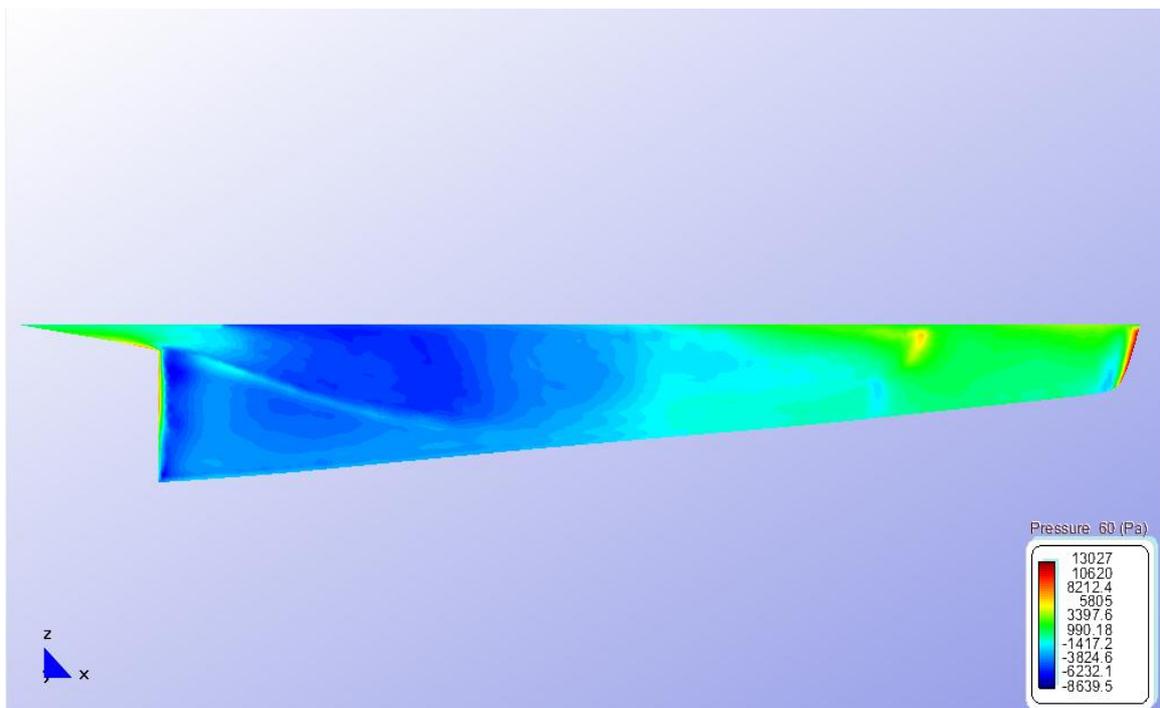
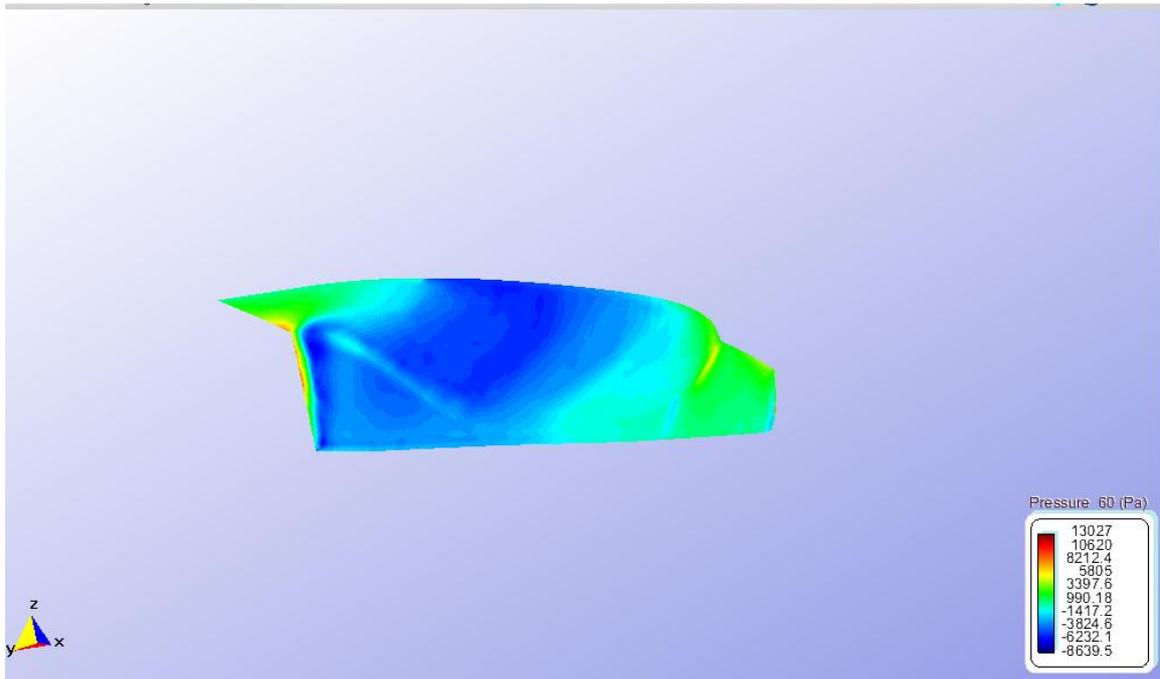
- Distribución de velocidades (m/s)



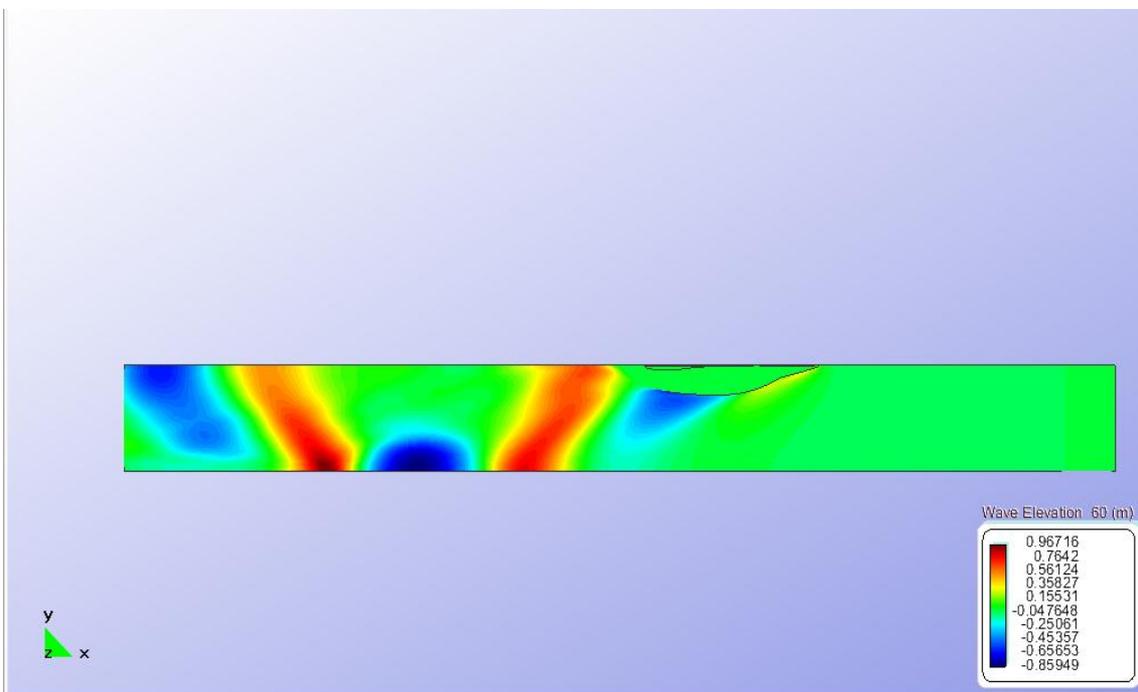
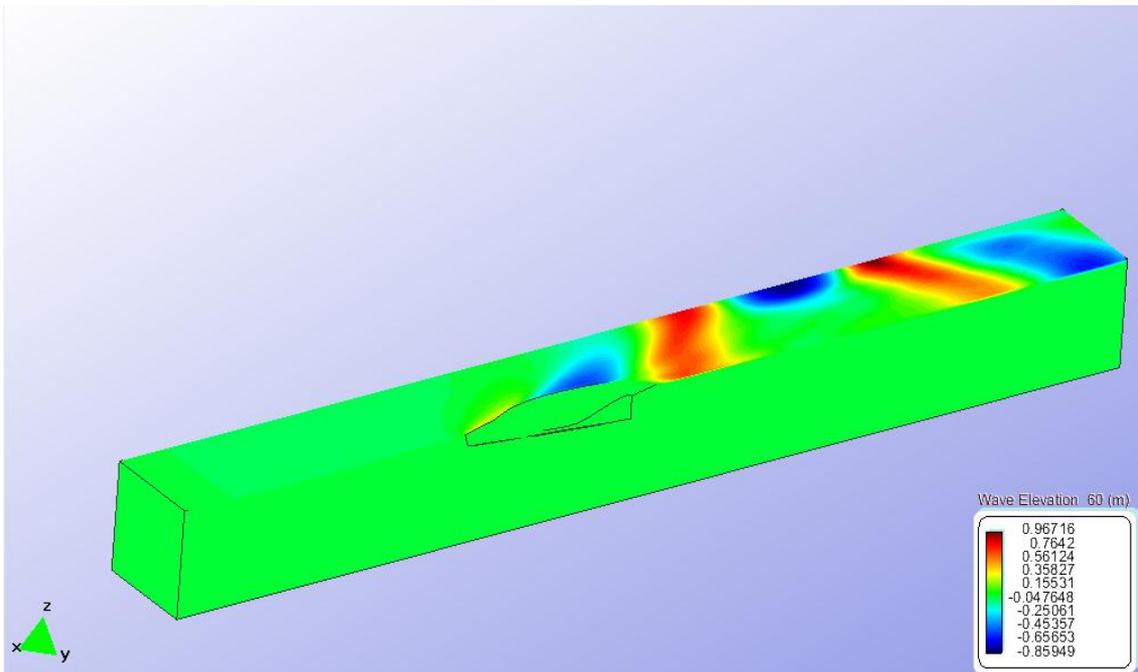


- Distribución de presiones (Pa)





- Distribución elevación de ola (m)

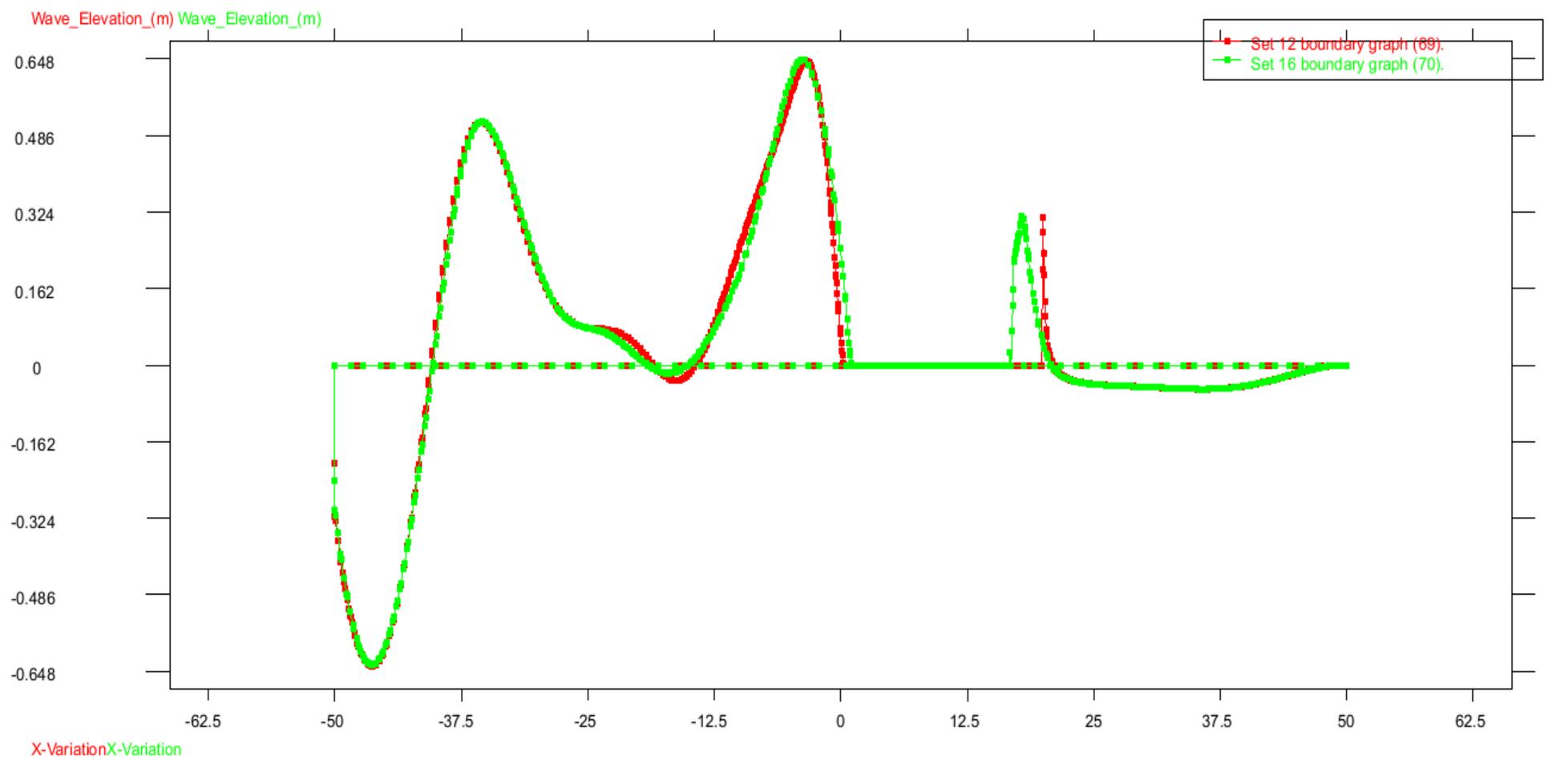


- Cortes elevación de ola (m)

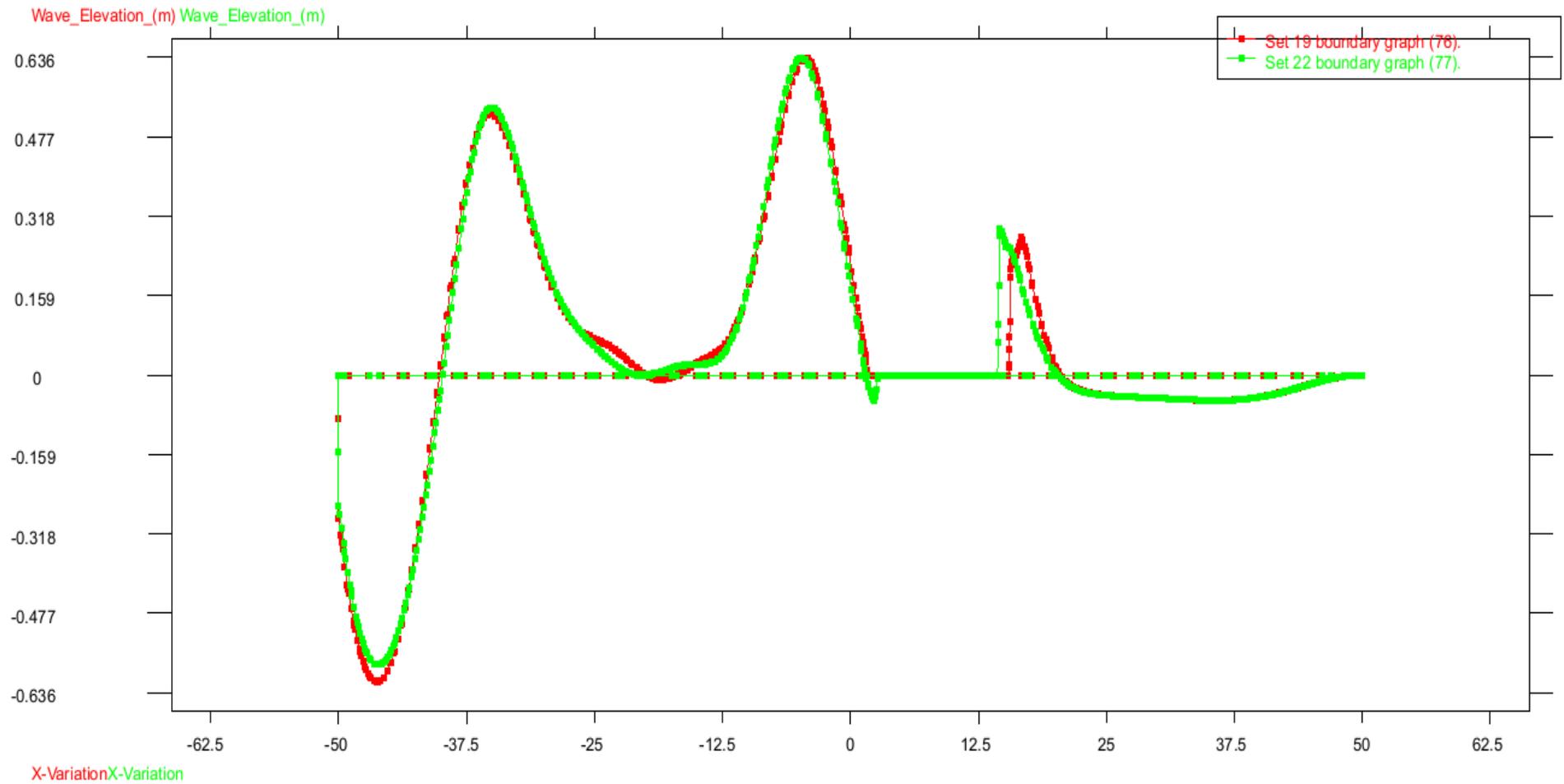
Los cortes de la ola se han realizado igual que los cortes para el análisis de la carena sin el bulbo.

En la representación gráfica de los cortes de la olas, en el eje de las ordenadas se tiene el valor de la altura de la ola en metros y en el eje de las abscisas está representada la longitud del volumen de control.

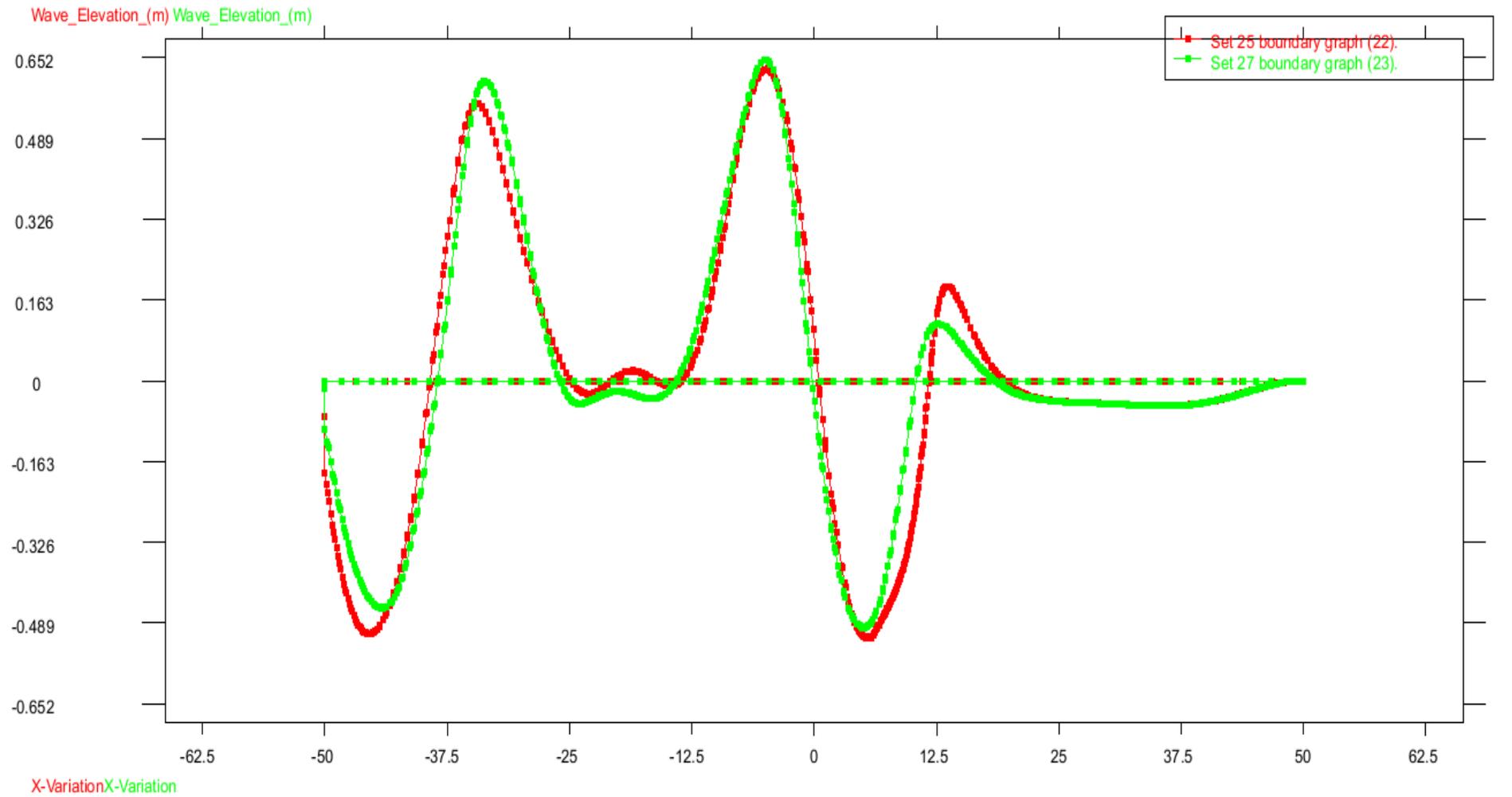
0,25B y 0,5B



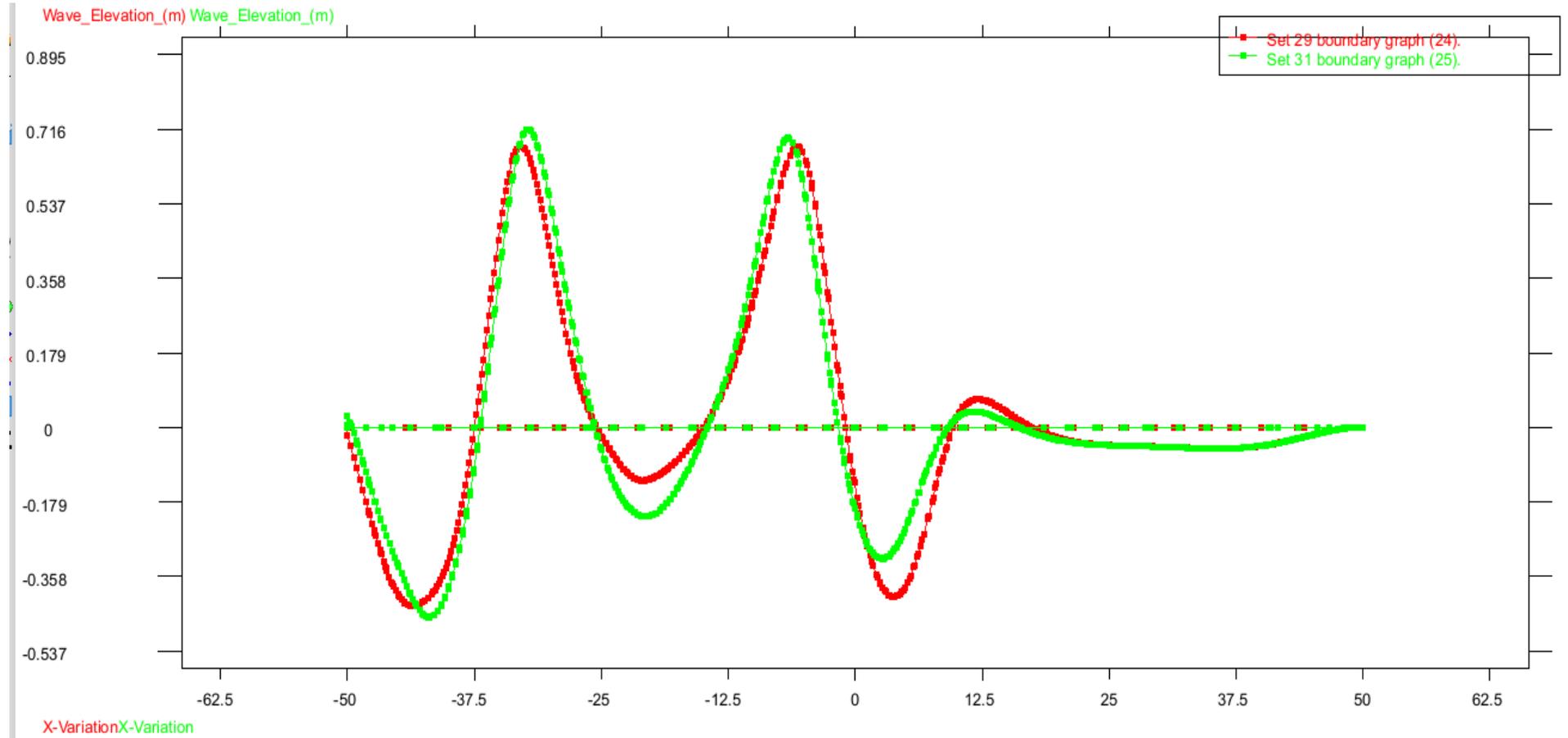
0,75B y 1B



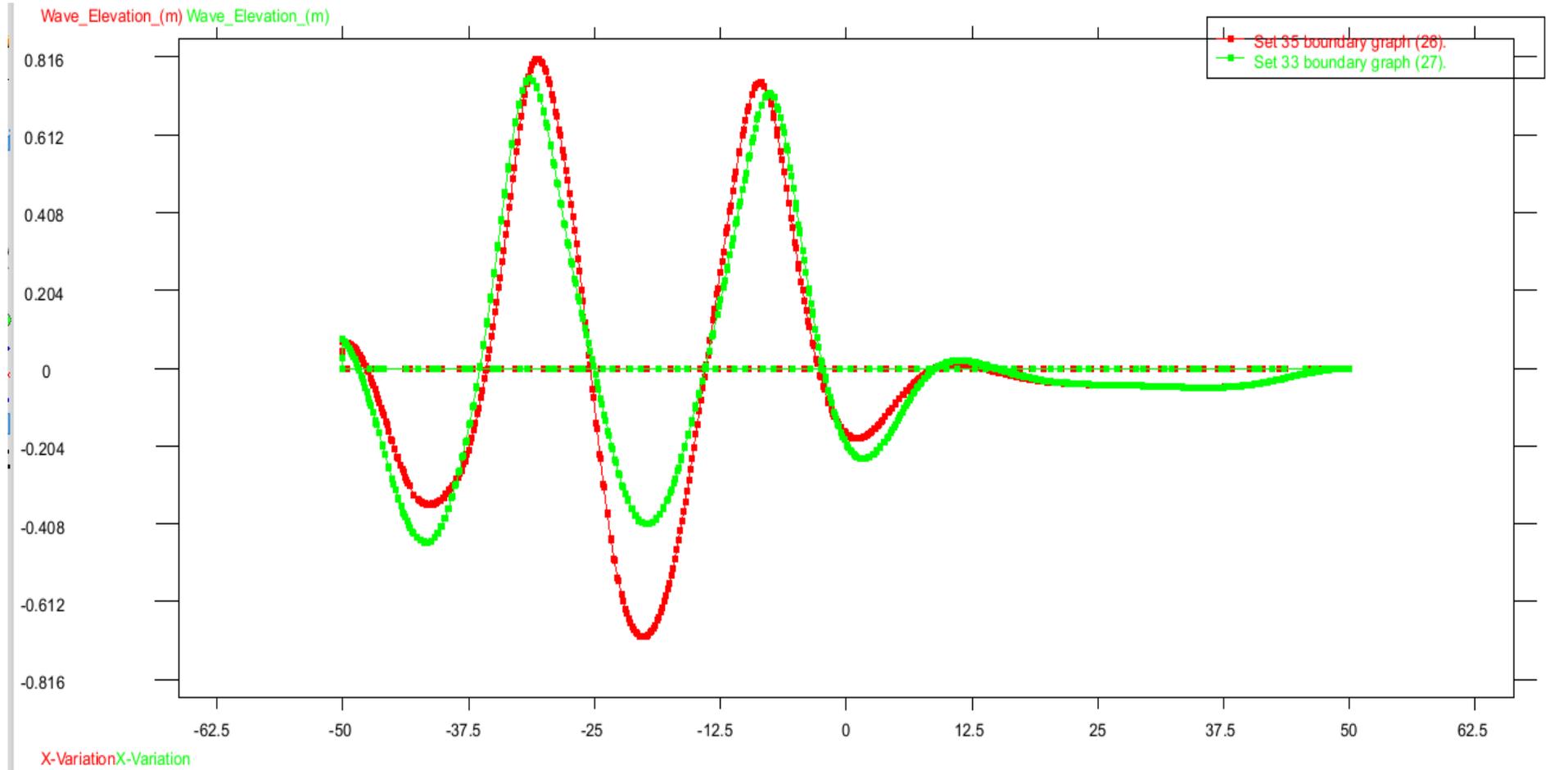
2B y 3B



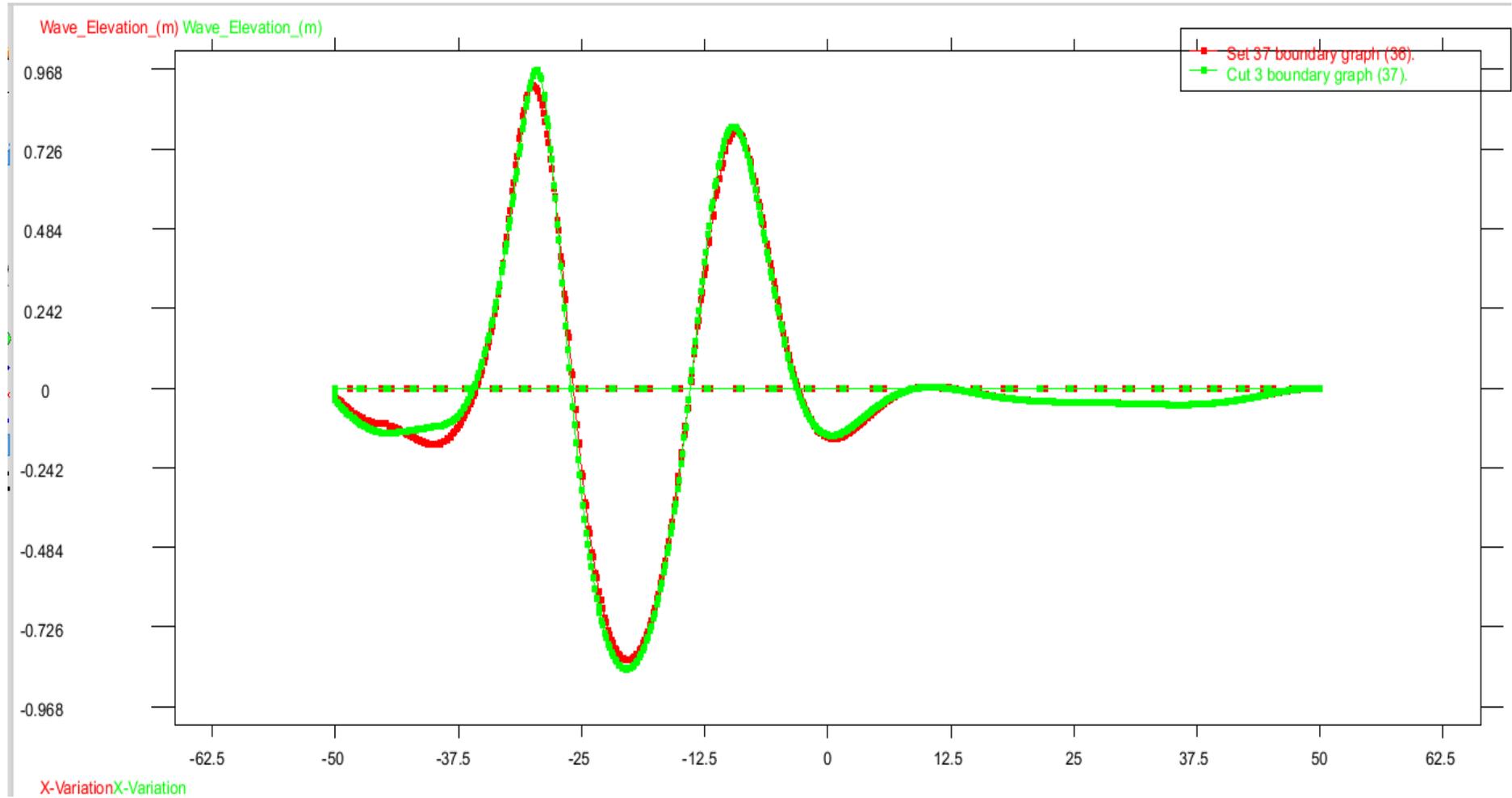
4B y 5B



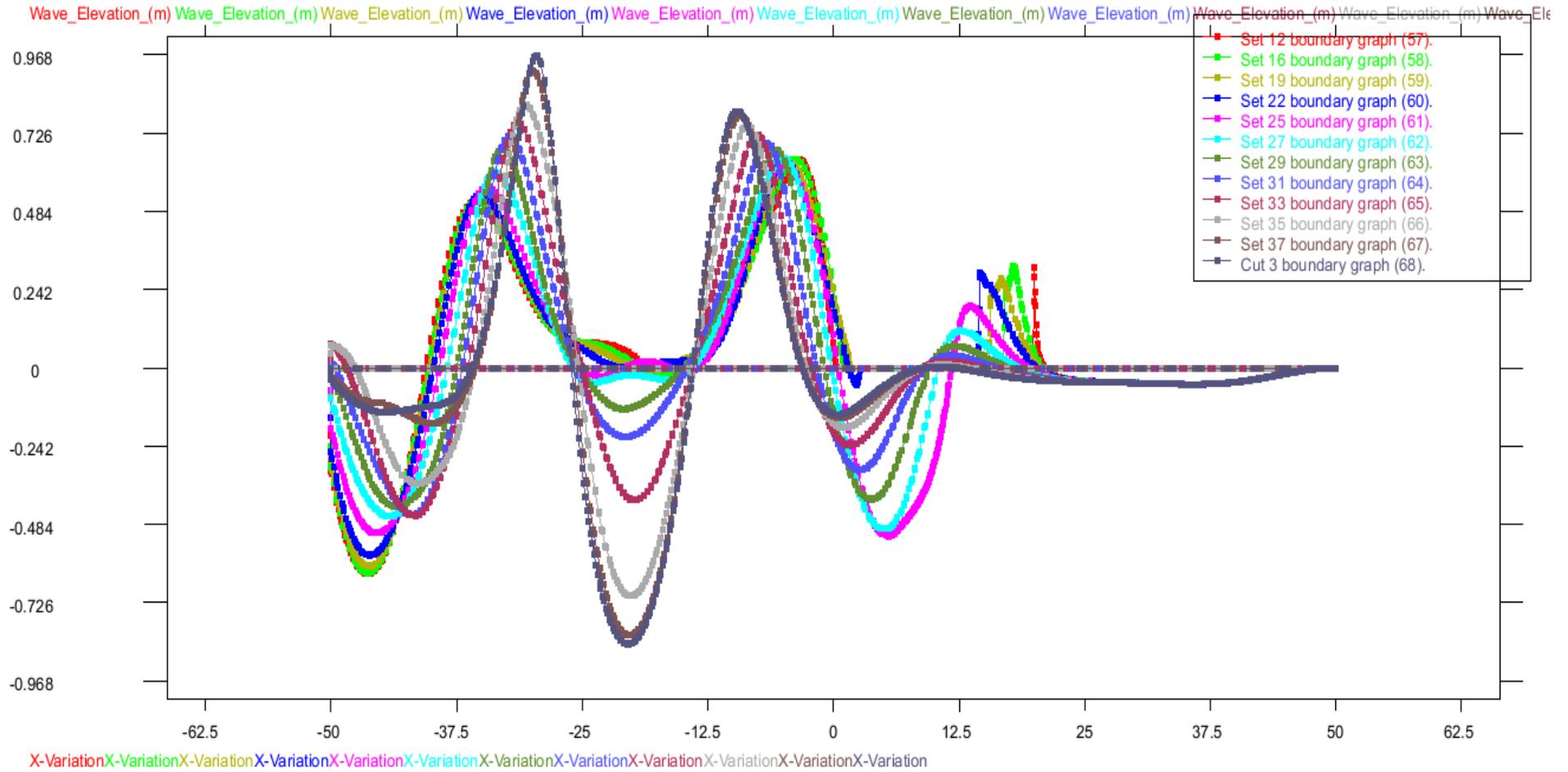
6B y 7B



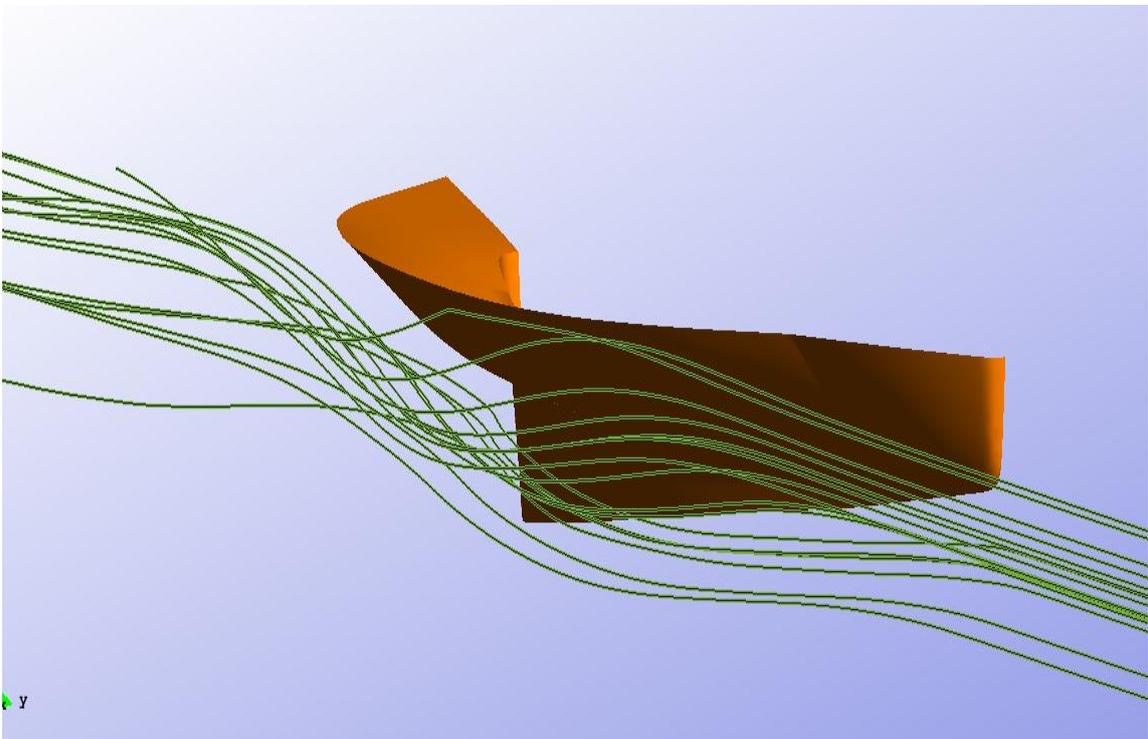
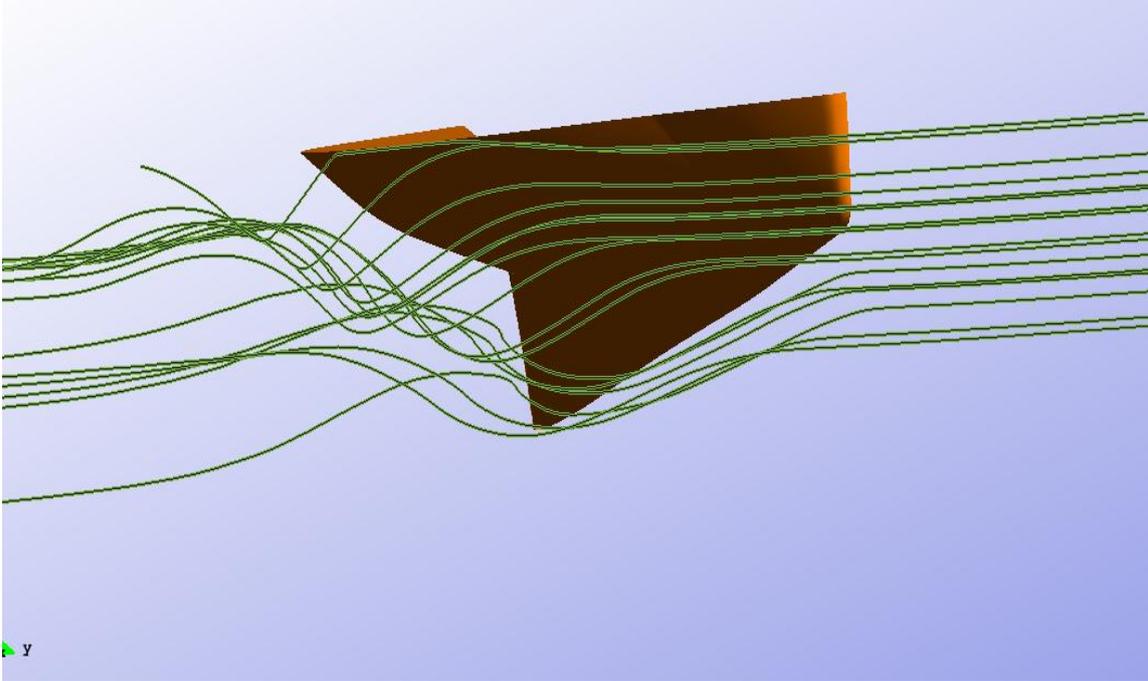
8B y 9B



Todos los cortes



- Distribución de las líneas de corriente.



- Resultado de fuerzas y momentos

```

Forces on Boundaries
T3_Wall/Bodies Auto1: (Final step 59.9)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
-9574.7   -66570   -79955
Pressure Moments (PMx PMy PMz)
 39107   5.7533e+005   -3.7573e+005
Static Pressure Forces (SPx SPy SPz)
 3.9406   3.2624e+005   3.3461e+005
StaticPressure Moments (SMx SMY SMz)
1.5615e+005   -3.2249e+006   2.9377e+006
Viscous Forces (VFX VFY VFZ)
-4506.4    30.581    29.369
Viscous Moments (VMx VMy VMz)
-113.77   4562.3   -7858.8
Total Forces
-14077   2.597e+005   2.5468e+005
Total Moments
1.9514e+005   -2.645e+006   2.5541e+006
*****
*****
Note:
  Pressure Forces are calculated by integrating pressure on surface
  Static Pressure Forces are calculated by integrating static pressure on
  surface
  Viscous Forces are calculated by integrating viscous stresses on surface
  Three cartesian components of forces and moments are given in both cases
  *****
  *****
Close

```

7.3 Comparación de los resultados

- Presiones y Velocidades

Comparando los resultados obtenidos en lo que se refiere a la velocidad y presión, se puede observar claramente que se cumple el Teorema de Bernoulli, es decir, las zonas que experimentan altas presiones registran bajas velocidades y las zonas que experimentan altas velocidades registran bajas presiones.

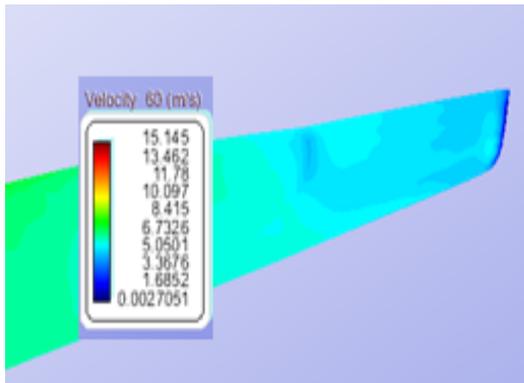
En la zona de proa es donde mejor se puede observar este fenómeno y mediante el análisis de los modelos se observa cómo se cumple el teorema de Bernoulli, en la proa de arriba que refleja la distribución de presiones, las zonas de color rojo oscuro representan zonas de alta presión, las cuales se deben

corresponder con zonas de baja velocidad, representadas por la proa de abajo en color azul.

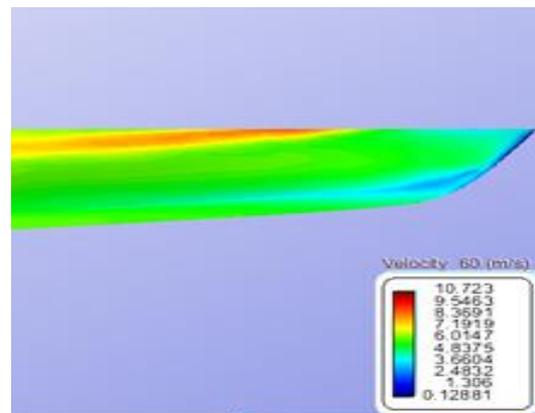
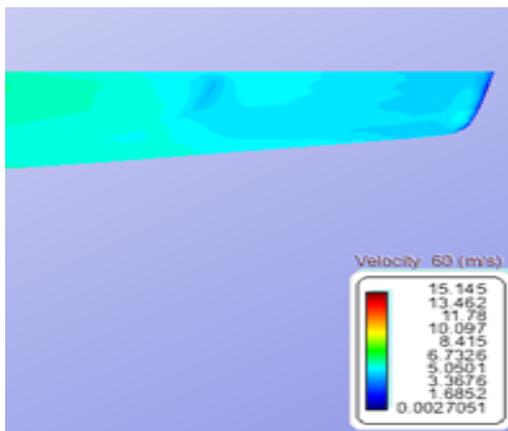
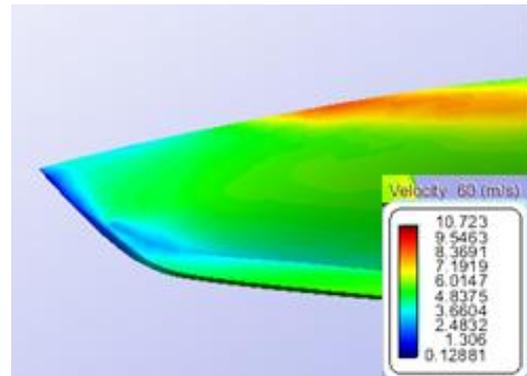
A lo largo de todo el casco se observa este mismo fenómeno reflejado por los diferentes colores de las leyendas.

- Velocidades

BARCO CON BULBO

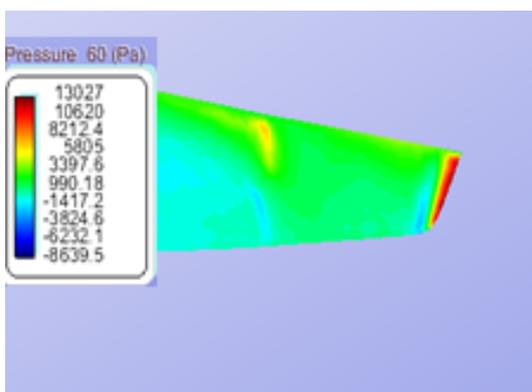


BARCO SIN BULBO

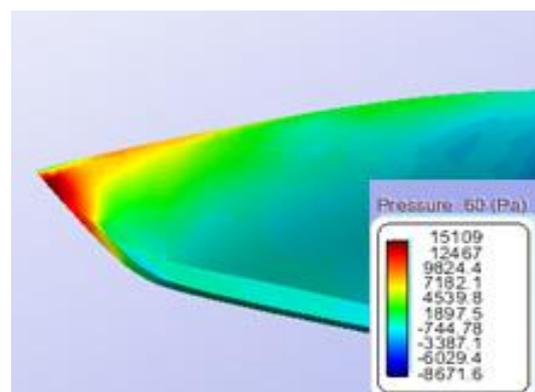


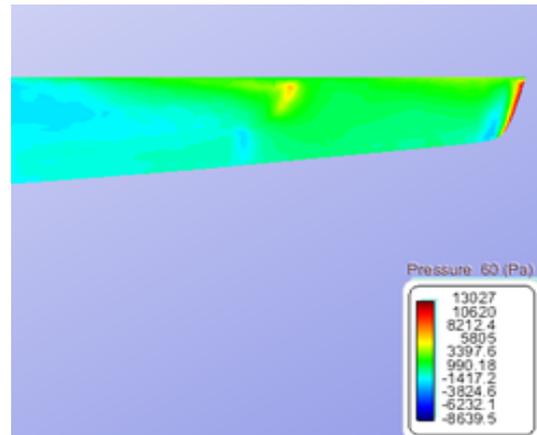
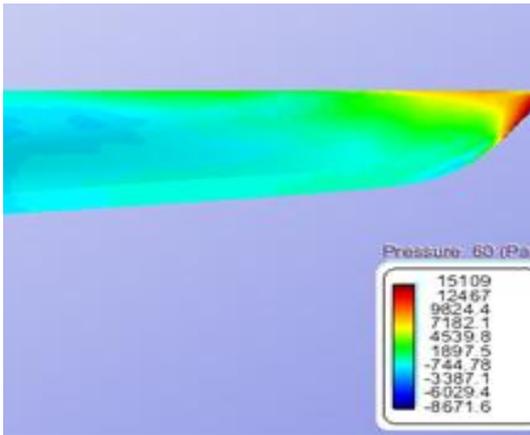
- Presiones

BARCO CON BULBO



BARCO SIN BULBO

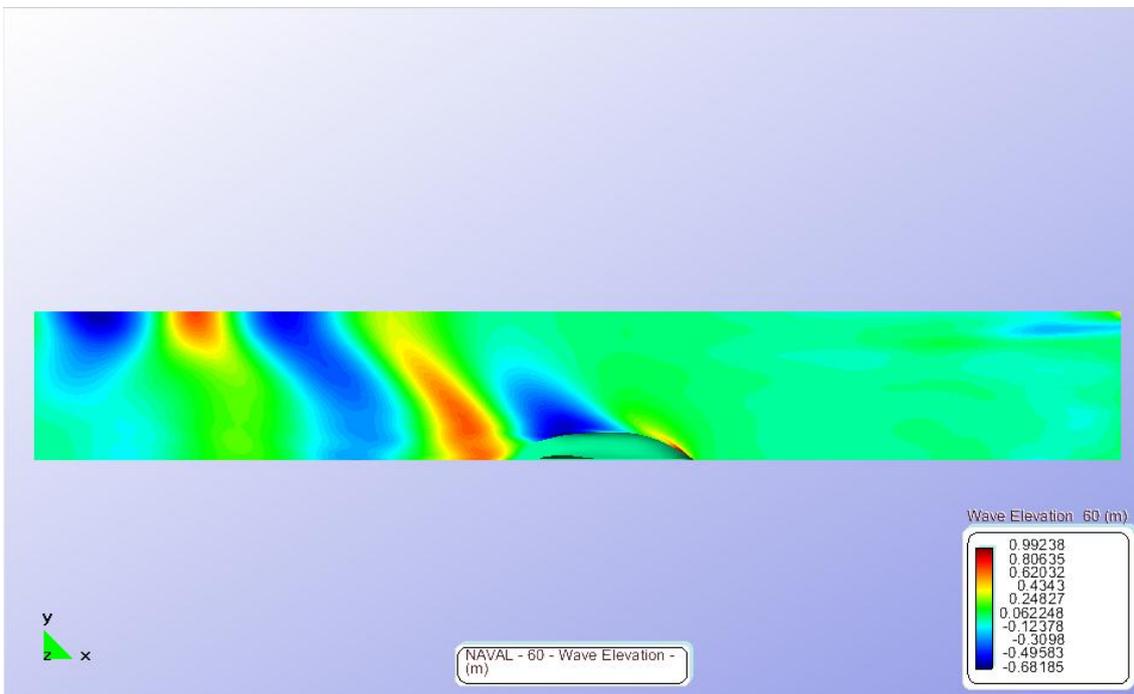


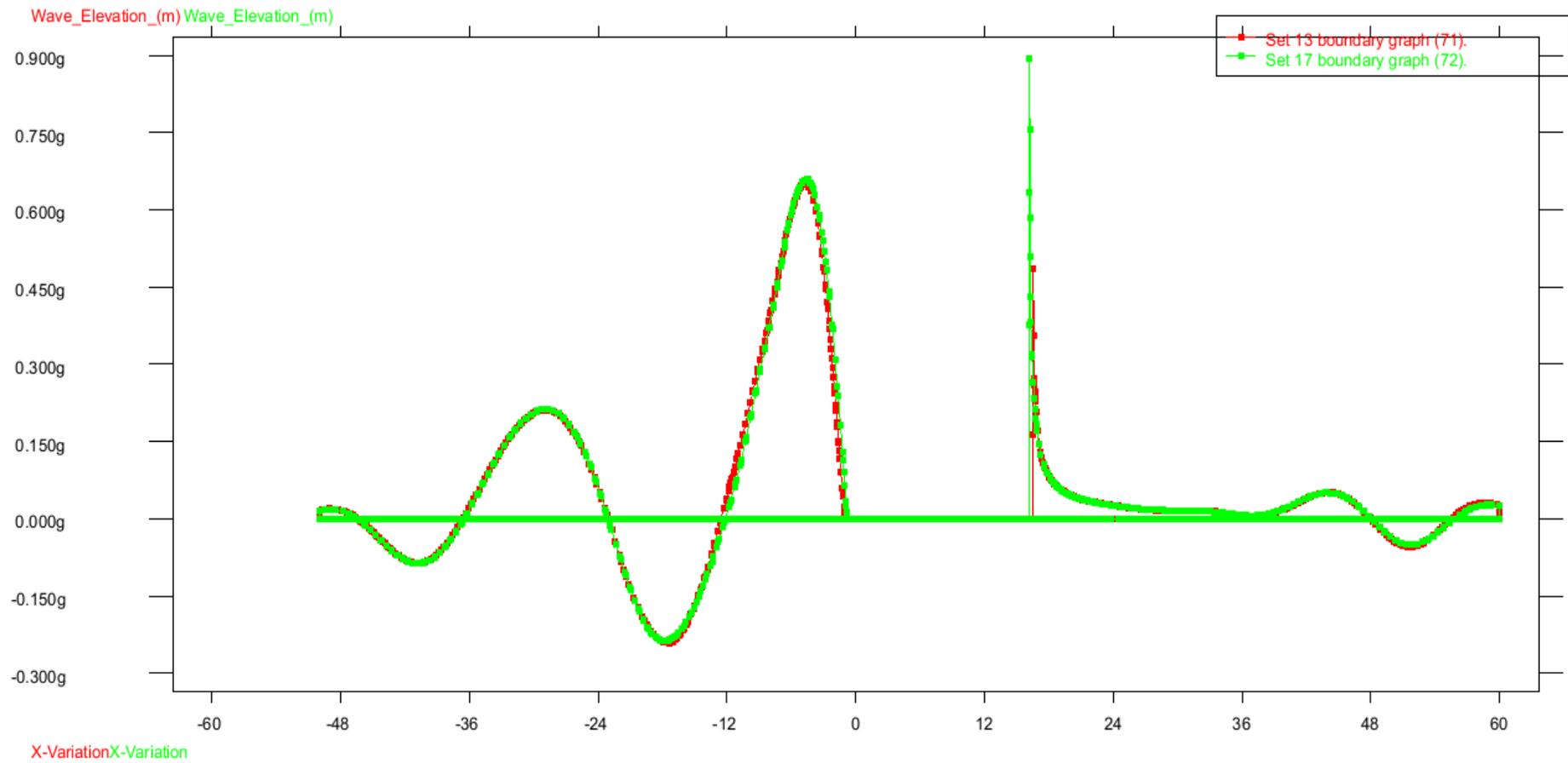


- **Elevación de ola**

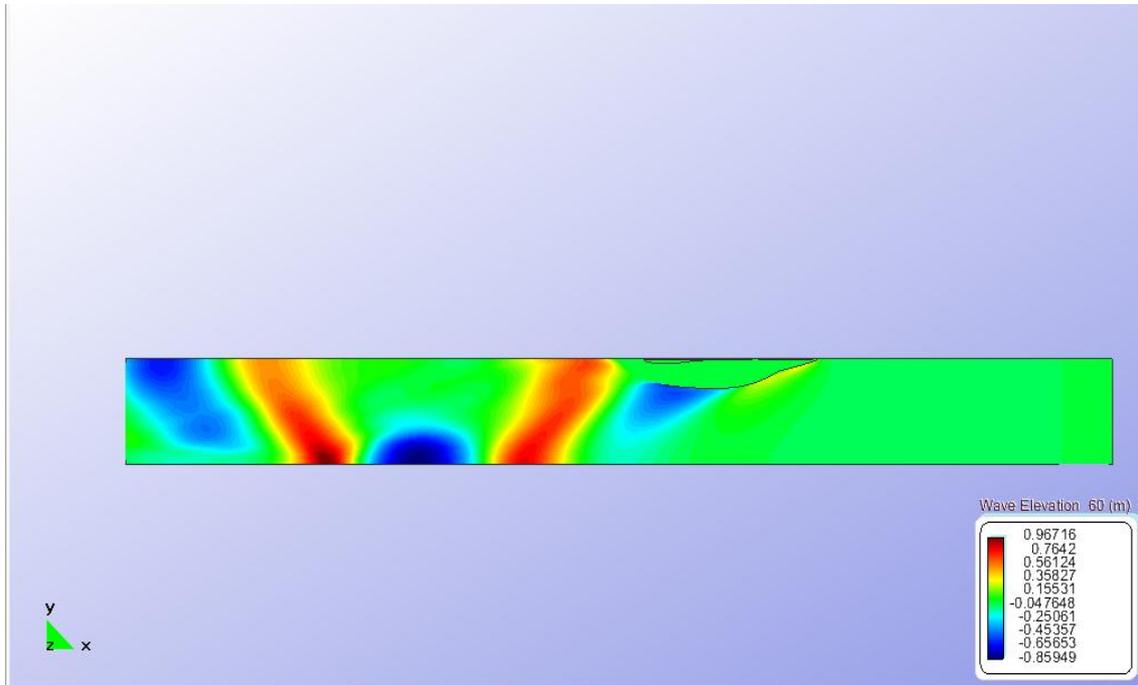
En cuanto a la elevación de ola se puede observar en las siguientes imágenes y gráficos.

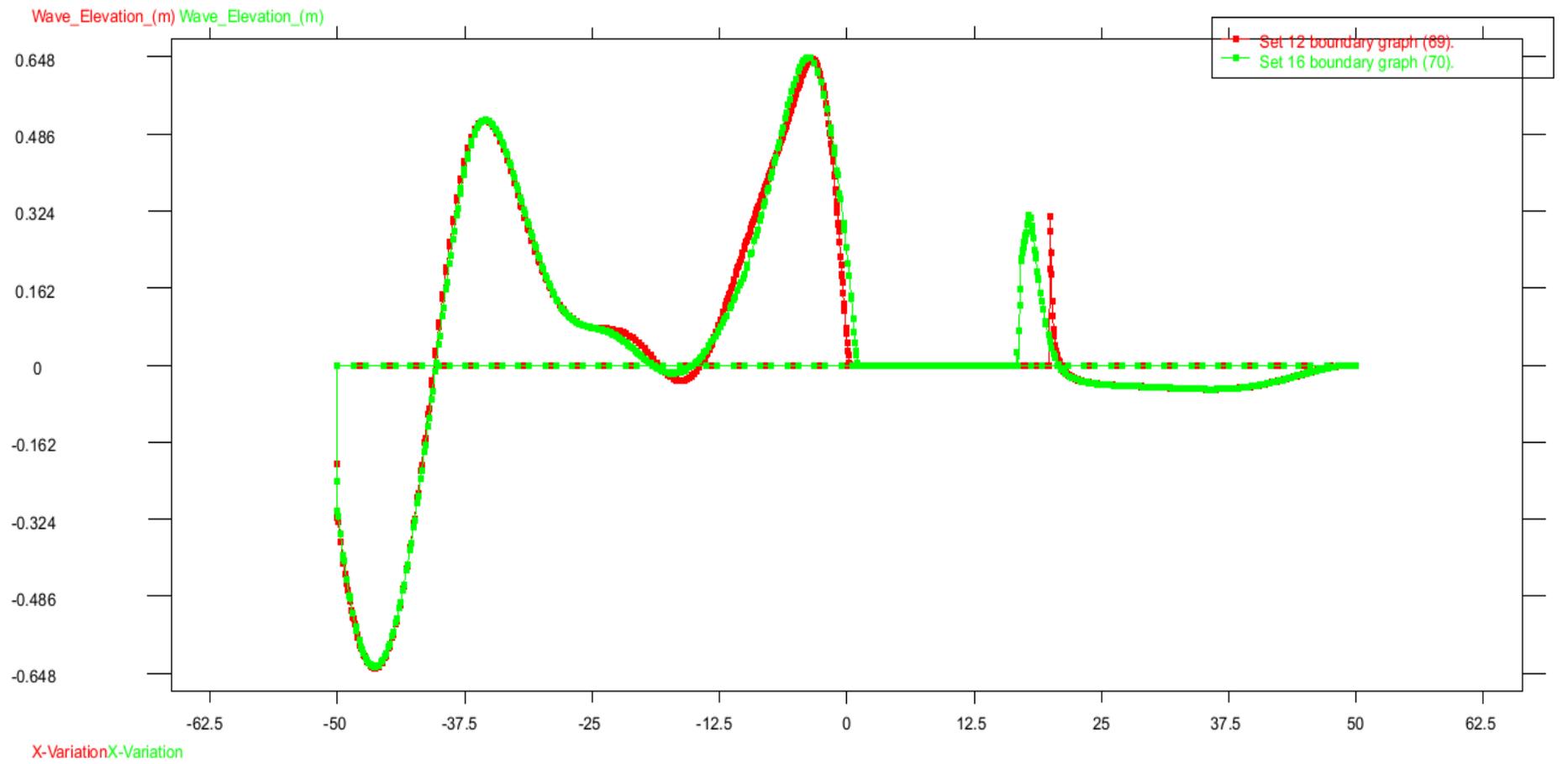
- Buque sin bulbo:





- Buque con bulbo:





- Comparación de dimensiones:

Seguidamente se hará una comparación de las dimensiones del buque con bulbo y el buque original. Para ello se ha utilizado el programa Maxsurf.

BUQUE ORIGINAL

- Eslora: 18,08 m
- Calado: 1,97 m
- Manga: 5,66 m
- Desplazamiento: 65,21 T

BUQUE CON BULBO

- Eslora: 20,19 m
- Calado: 1,97 m
- Manga: 5,66 m
- Desplazamiento: 75,07T

8 Conclusión

Se puede concluir que hoy día los CFD sustituyen en muchos casos a los canales y dan más información que la obtenida en los ensayos tradicionales y se siguen desarrollando favorablemente. Son una herramienta muy útil en las fases iniciales del proyecto, cuando aún no se conoce prácticamente nada de este, y pueden dar una primera idea del comportamiento del buque.

A la vista de los resultados obtenidos en el análisis mediante CFD's se puede concluir que el bulbo le da al casco primitivo una mejora este en cuanto a la hidrodinámica y resistencia al agua se refiere.

Se puede observar en el gráfico de elevación de ola anterior, que en el corte hecho cerca de la crujía (0,25B y 0,5B) la elevación de ola en la carena con bulbo es menor que la elevación en la carena sin bulbo (carena original). La elevación de ola en proa en el caso con bulbo llega hasta 0,6 m, mientras que en el caso original sin bulbo llega hasta los 0,9 m para una misma velocidad y condiciones de contorno. Esto para una misma velocidad y condiciones de contorno significa que la resistencia al avance que tendrá la carena con bulbo será menor que la de la carena sin bulbo.

También se puede comentar que las presiones máximas obtenidas en la carena con bulbo son menores que las obtenidas en la carena sin bulbo.

A la vista de estos resultados se podría concluir que ponerle un bulbo como este a la carena del buque original sería beneficioso, mejoraría su velocidad y reduciría la resistencia al avance.

Bibliografía

- Sánchez Nieto Manuel M. Mecánica de fluidos general.
- Álvaro Pérez Molero y Carlos Garre del Olmo. Dinámica de fluidos computacional para gráficos.
- Tdyn Tutorial. Environment for Multi-Physics simulation, including Fluid Dynamics, Turbulence, Heat Transfer, Advection of Species, Structural mechanics, Free surface and user defined PDE solvers.
- Tdyn Theoretical background.
- Tdyn 3D Tutorial.
- Tdyn 2D Tutorial.
- Tdyn GiD Reference Manual.
- Tdyn Ram Series Tutorial.
- Tdyn User Manual.

Páginas web

- www.compassis.com

Software

- Tdyn 11.0.12
- Rhinoceros 4.0
- Maxsurf
- Autocad 2010
- Hidromax Pro