



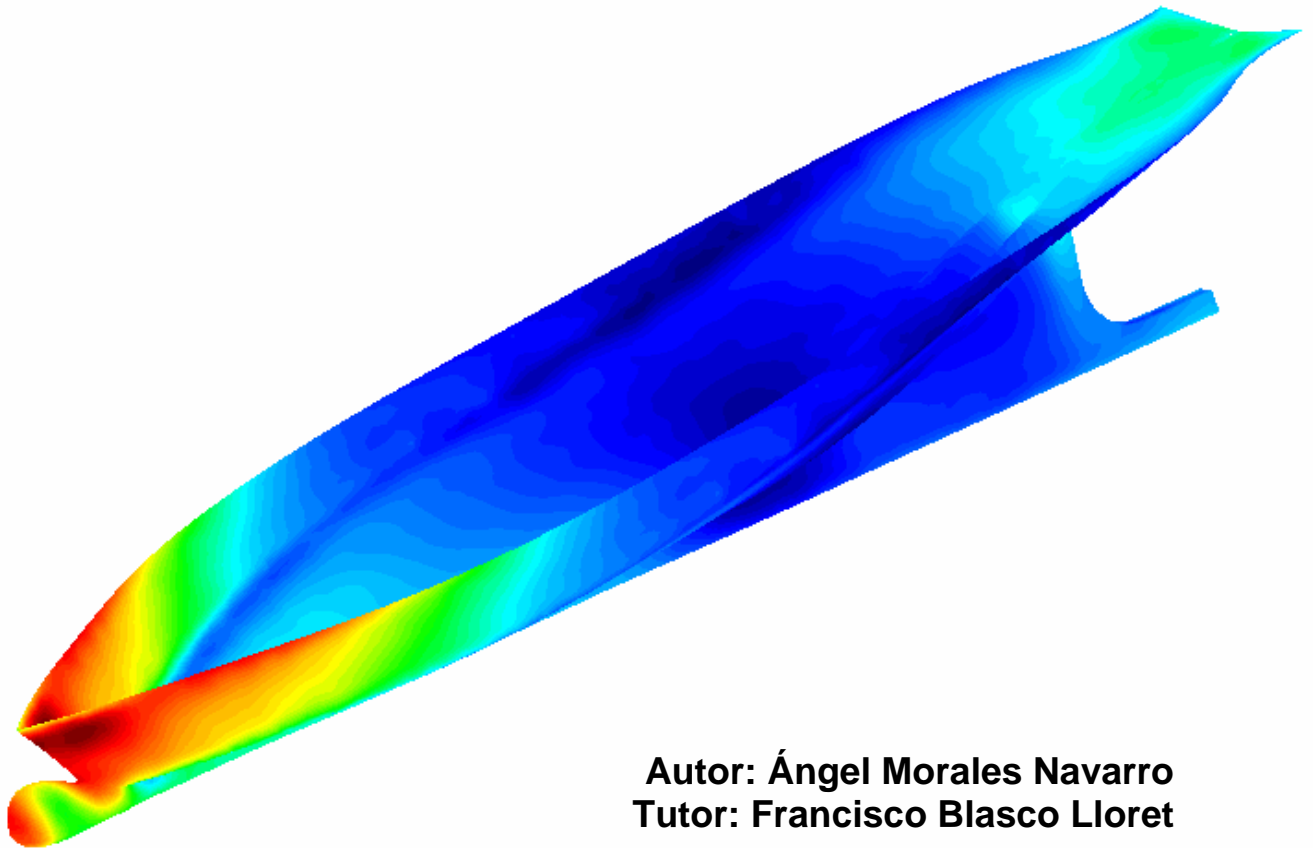
UNIVERSIDAD
POLITECNICA DE
CARTAGENA



ESCUELA TECNICA
SUPERIOR DE
INGENIERIA NAVAL Y
OCEANICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DE
UNA CARENA
MEDIANTE UN CFD



Autor: Ángel Morales Navarro
Tutor: Francisco Blasco Lloret

Junio 2006

A mi madre y a mi abuela.

AGRADECIMIENTOS

En un lugar de la Politécnica de cuyas clases quiero olvidarme, un día del año 2001 comencé una carrera de obstáculos a la que, con este proyecto, llego a la meta. Ha sido una carrera larga y complicada, pero siempre he tenido un “público” entregado que ha estado conmigo en todo momento.

La primera persona a la que quiero mencionar es a mi **madre**, porque creo que desde el comienzo de este proyecto han pasado muy pocos días en los que no me haya preguntado que tal iba, porque siempre ha tenido palabras de ánimo en los momentos más duros de la carrera, y palabras de consuelo ante exámenes suspensos, simplemente agradecerle que ha estado y estará SIEMPRE a mi lado y que NUNCA me ha fallado ni me fallará.

A mis **hermanos**, porque a su manera también me han ayudado y echado una mano en todo aquello que ha estado a su alcance, sin importarles tener que haber perdido tardes enteras conmigo explicándome cosas.

A mi tutor de proyecto, Francisco Blasco Lloret, por haber sufrido conmigo las dificultades que nos ha presentado el programa Tdyn y por la ayuda que me ha prestado.

A mi buen amigo Emilio, porque sus palabras de ánimo en mi primer año de universidad fueron muy importantes para superar esta carrera de obstáculos con la que él me comparaba la carrera.

A cuatro compañeros de clase, que han pasado de ser compañeros de universidad a ser GRANDES AMIGOS; a Alberto, porque sin su ayuda algunas de las asignaturas más difíciles de la carrera lo hubieran sido más aún; a mi Maria y a mi Lolica, porque sin ellas y sin sus apuntes, las clases hubieran sido mucho más aburridas y difíciles de “tragar” de lo que lo son; y a Gines por sus valiosas lecciones de la vida y todo lo que me a enseñado (él ya me entiende).

A todas aquellas personas que se han incorporado a mi vida en este tiempo y a las que prefiero no mencionar para evitar así dejarme a alguna en el tintero, porque gracias a ellas este periodo de mi vida ha sido más agradable y ameno.

Gracias.

INDICE

Preámbulo	1
1. Los " CFD "	2
1.1 Algo de historia sobre los CFD	2
1.2 Clasificación de los métodos de CFD	3
1.3 Los campos hidrodinámicos de los CFD	4
1.4 La validación de los CFD	6
2. Mecánica de fluidos	7
2.1 Definición de fluido	7
2.2 Propiedades de un fluido	8
2.2.1 Densidad	8
2.2.2 Viscosidad	8
2.2.3 Fuerzas y presión	9
2.3 Tipos de flujo	10
2.3.1 Clasificación de los flujos	10
2.3.1.1 Flujo estacionario y no estacionario	10
2.3.1.2 Flujo laminar y turbulento. Número de Reynolds	10
2.4 Aspectos teóricos de la Mecánica de Fluidos	11
2.4.1 Ecuación conservación de la masa	11
2.4.2 Ecuación de Bernoulli	11
2.4.3 Ecuaciones de Navier-Stokes	12
2.4.4 Capa Límite	12
3. Tdyn	13
3.1 Pre-proceso	14
3.1.1 Creación de la geometría (geometry definition)	14
3.1.2 Condiciones (condition assignment)	15
3.1.2.1 Fijar presión (fix pressure)	15
3.1.2.2 Fijar Velocidad (fix velocity)	16
3.1.2.3 Fijar vector velocidad (fix velocity component)	16
3.1.2.4 Fijar la dirección de la velocidad (fix velocity direction)	16
3.1.2.5 Cambiar condiciones de la velocidad (remove velocity condition)	16
3.1.2.6 Campo de presiones (pressure field)	16
3.1.2.7 Campo de velocidad (velocity field)	16
3.1.2.8 Fijar turbulencia (fix turbulence)	16
3.1.2.9 Fijar gradiente nulo (fix null gradient)	16
3.1.2.10 Condiciones disponibles en el módulo Naval	17
3.2 Materiales (materials)	17
3.2.1 Material del Fluido (Fluid material)	17
3.2.2 Cuerpo fluido (Fluid Body)	19
3.2.3 Límites (boundaries)	20
3.2.4 Datos del problema (problem data)	20
3.2.5 Generación de la malla (mesh generation)	21

3.3 Cálculo (calculate)	21
3.4 Post-proceso (post-processing)	22
3.5 Tdyn Wizard	22
3.5.1 Pasos preliminares	23
3.5.2 Diferentes casos a resolver con Tdyn Wizard.....	23
3.5.3 Creación del volumen de control (create control volume)	25
3.5.4 Definición de los datos (define data)	26
3.5.5 Generación de la malla (generate mesh)	27
3.5.6 Cálculos (calculate)	29
3.5.7 Post-proceso (Post-processing)	30
3.5.8 Gráficas (making graphs)	31
3.5.9 Informes (reporting)	32

4. Viabilidad de un caso práctico _____ 33

4.1 Diseño de la geometría	33
4.1.1 Generación de la geometría	34
4.1.2 Importación de la geometría.....	35
4.1.3 Generación de la superficie del casco	37
4.1.4 Diseño de los bulbos	39
4.1.5 Creación del volumen de control	39
4.1.6 Condiciones de contorno.....	41
4.1.6.1 RANSOL.....	41
4.1.6.2 NAVAL.....	42
4.1.7 Materiales (materials)	44
4.1.8 Limites (boundaries)	45
4.1.9 Datos iniciales (inicial data)	46
4.1.10 Datos del problema (problem data).....	47
4.1.11 Datos del módulo Tdyn (Tdyn modules data)	49
4.1.12 Generación de la malla (generate mesh)	50
4.1.13 Cálculo (calculate)	51
4.1.14 Post-proceso (postprocess).....	51

5. Visualización y comentario de resultados _ 52

5.1 Resultados correspondientes a la carena original.....	53
5.1.1 Distribución de velocidades.....	53
5.1.2 Distribución de presiones	55
5.1.3 Mapa de olas y cortes	57
5.1.4 Distribución de líneas de corriente a lo largo del casco,detalle de algunas zonas..	71
5.1.5 Resultado de fuerzas y momentos.....	72
5.2 Resultados correspondientes a la carena con bulbo 1	73
5.2.1 Distribución de velocidades, todas las velocidades están en m/s	73
5.2.2 Distribución de presiones a 11 nudos	75
5.2.3 Mapa de olas y cortes	77
5.2.4 Distribución de líneas de corriente a lo largo del casco,detalle de algunas zonas..	90
5.2.5 Resultado de fuerzas y momentos.....	91
5.3 Resultados correspondientes a la carena con bulbo 2	92
5.3.1 Distribución de velocidades, todas las velocidades están en m/s	92
5.3.2 Distribución de presiones	94
5.3.3 Mapa de olas y cortes	96
5.3.4 Distribución de líneas de corriente a lo largo del casco,detalle de algunas zonas	109
5.3.5 Resultado de fuerzas y momentos	110

6. Comentario de los resultados obtenidos _ 111

6.1 Velocidades y Presiones..... 111

6.2 Mapa de olas y cortes con la superficie libre 113

6.2.1 Mapa de olas para modelo original (escala en m) 113

6.2.2 Mapa de olas modelo bulbo 1 114

6.2.3 Mapa de olas modelo bulbo 2 115

Cortes de la ola a $0.5*B$ 116

Cortes de la ola a $1.25*B$ 117

Cortes de la ola a $3*B$ 118

CONCLUSIONES _____ 119

BIBLIOGRAFIA _____ 120

Páginas Web de interés: _____ 120

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Fluido contenido entre dos placas.....	8
Ilustración 2: Fuerzas de superficie.....	9
Ilustración 3: Perfil de velocidades.....	10
Ilustración 4: Movimiento de las partículas de un fluido.....	11
Ilustración 5: Evolución de la capa límite.....	12
Ilustración 6: Capa límite y turbulenta a lo largo de una placa lisa.....	13
Ilustración 7: Pasos a seguir en el análisis.....	14
Ilustración 8: Asignación a una recta determinada.....	15
Ilustración 9: Asignación de propiedades fluidas.....	17
Ilustración 10: Asignación de límites.....	20
Ilustración 11: Parámetros de análisis para la resolución del cálculo.....	21
Ilustración 12: Icono generación de malla.....	21
Ilustración 13: Icono inicio del cálculo.....	22
Ilustración 14: Icono información de la evolución de la resolución.....	22
Ilustración 15: Icono capas.....	25
Ilustración 16: Creación del volumen de control.....	26
Ilustración 17: Definición de los datos.....	26
Ilustración 18: Generación de malla.....	28
Ilustración 19: Ventana de proceso.....	29
Ilustración 20: Icono calculate.....	29
Ilustración 21: Icono Output view.....	29
Ilustración 22: Icono Stop.....	30
Ilustración 23: Icono Draw forces on Bodies.....	30
Ilustración 24: Resultados.....	30
Ilustración 25: Select and display style.....	31
Ilustración 26: Visualización de gráficas.....	32
Ilustración 25: Plano de formas.....	34
Ilustración 26: Caja de cuadernas.....	35
Ilustración 27: Detalle del tamaño destinado al dibujo por Rhincoeros.....	35
Ilustración 28: Caja de cuadernas girada y escalada.....	36
Ilustración 29: Vistas de alzado, planta y perfil, escaladas y giradas según los ejes más convenientes.....	36
Ilustración 30: Cuadernas en verdadera posición cortadas por línea de flotación y sin quillote.....	37
Ilustración 31: Superficie del casco con zona para alisar en popa.....	37
Ilustración 32: Superficie del quillote y quilla.....	38
Ilustración 33: Superficie del casco a estudiar hidrodinámicamente.....	38
Ilustración 34: Bulbo 1.....	39
Ilustración 35: Bulbo 2.....	39
Ilustración 36: Generación del volumen de control.....	40
Ilustración 37: Icono generación de línea.....	40
Ilustración 38: Icono generación de superficies.....	40
Ilustración 39: Icono generación de volúmenes.....	40
Ilustración 40: Comparación de los cascos.....	41
Ilustración 41: Volumen de control.....	41
Ilustración 42: Pressure Field.....	42
Ilustración 43: Velocity Field.....	42

Ilustración 44: Condición de contorno del módulo naval.....	43
Ilustración 45: Señalización de las condiciones de contorno.....	43
Ilustración 46: Condiciones de contorno del módulo RANSOL.....	44
Ilustración 47: Selección del material.....	44
Ilustración 48: Asignación de materiales.....	45
Ilustración 49: Asignación de materiales.....	45
Ilustración 50: Initial Data.....	46
Ilustración 51: Problem and Analysis.....	47
Ilustración 52: Results.....	48
Ilustración 53: Fluid Solver and Solid Solver.....	48
Ilustración:54: Other.....	49
Ilustración 55: Ventana datos del módulo. Definición del modelo de turbulencia.....	50
Ilustración 56: Generación de malla.....	50

Preámbulo

El objetivo de este proyecto es tener una primera toma de contacto con la utilización de un programa de ordenador que utiliza los *elementos finitos* como herramienta de cálculo (Tdyn), y comprobar la viabilidad y posible optimización que puede tener la modificación de la carena de un pesquero que originalmente no dispone de bulbo, mediante el acople de dos bulbos.

Mediante el acople de los bulbos se pretende una disminución de la resistencia de remolque, y que por tanto con la misma potencia motora el barco sea capaz de alcanzar una mayor velocidad.

Como se comprobará en los resultados, la optimización no es totalmente alcanzada, ya que según los datos calculados por el programa, la resistencia de remolque es menor con la forma de la carena original que con cualquiera de los bulbos ensayados.

Aunque el objetivo no se haya alcanzado de manera satisfactoria en tanto que a resistencia de remolque se refiere, al menos podemos hacernos una idea del alcance y utilización de una herramienta como los CFDs (computational fluids dynamics), que actualmente están en continuo desarrollo y que se utilizan en muchos campos más a parte del de la Ingeniería Naval.

Los resultados obtenidos se dividen en distribución de presiones y velocidades a lo largo del casco (Teorema de Bernoulli), elevaciones de la ola en diferentes cortes, visualización de líneas de corriente y fuerzas y momentos calculados según Tdyn.

La estructuración de este proyecto se ha hecho de la siguiente manera:

- **Los CFD:** introducción a los CFD (computational fluid dynamics).
- **Mecánica de fluidos:** aspectos teóricos de la mecánica de fluidos.
- **Tdyn:** introducción a Tdyn, nociones básicas para el uso del programa.
- **Viabilidad de un caso práctico:** estudio de una carena que originalmente no dispone de bulbo y a la cual le acoplamos dos bulbos.
- **Visualización y comentario de los resultados:** visualización, estudio y comparación de los resultados obtenidos.

1. Los " CFD "

La idea de resolver un problema de mecánica de fluidos mediante aproximación matemática con la ayuda de un ordenador constituye la base de los denominados CFD, "computational fluid dynamics".

El diseño de las formas de un buque requiere el ensayo con modelos a fin de obtener una información básica como puede ser la resistencia por formación de olas, comportamiento en la mar o maniobrabilidad. Sin embargo, los ensayos hidrodinámicos de modelos de buques tienen una serie de inconvenientes: elevado coste, cierta indeterminación por los efectos de escala y un largo periodo de tiempo desde la especificación inicial hasta el análisis de los resultados. Es por lo tanto deseable el desarrollar una serie de actuaciones que reduzcan los ensayos mencionados, al menos en la etapa inicial del anteproyecto.

Los CFD han experimentado grandes avances y actualmente se utiliza de forma rutinaria en muchos diseños, tanto en barcos de gran tonelaje como en embarcaciones de competición. Hemos de reconocer que esta herramienta es relativamente nueva en el marco de la Ingeniería Naval y actualmente, los CFD no pueden dar una respuesta exacta y completa al proyectista. Sin embargo, la utilización de esta herramienta puede proporcionar información sobre la sensibilidad del proyecto antes ciertos cambios en parámetros básicos del diseño y sobre todo, bajo un aspecto cualitativo.

1.1 Algo de historia sobre los CFD

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, 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 técnico.

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} , 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.

Se han utilizado métodos numéricos como: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos y se han obtenido buenos resultados.

Todo ello ha dado lugar a la aparición de una nueva disciplina en el campo de la Mecánica de Fluidos, la comentada “Mecánica 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.

1.2 Clasificación de los métodos de CFD

A continuación se presenta un intento de clasificar y comprar al menos las principales aproximaciones de cálculo mediante ordenador para la predicción del flujo alrededor de un buque.

La solución numérica directa de las ecuaciones de Navier-Stokes para las aplicaciones en la hidrodinámica del buque no se puede conseguir en la actualidad. Sin embargo, partiendo de estas ecuaciones pueden utilizarse dos modelos más sencillos: uno basado en la aproximación de la capa límite de Prandtl y el otro, utilizando un modelo de turbulencia.

La aproximación de la “capa límite” es la más eficiente aproximación para flujos con número de Reynolds altos, aunque sus resultados no sean muy precisos. La eficiencia obtenida en este caso es debido al adecuado tratamiento analítico de las ecuaciones completas de Navier-Stokes, con la hipótesis de que los efectos están concentrados en una zona relativamente fina junto a la pared sólida del dominio considerado y que dan lugar a una solución interna que se puede obtener por métodos de perturbaciones singulares.

Cuando esta hipótesis es válida, el comportamiento de la parte de flujo fuera de la “capa límite” se puede considerar como no viscoso. Siguiendo la aproximación de Prandtl, se debe encontrar inicialmente la solución externa y entonces transmitir la información desde el flujo exterior (que realmente determina el campo de presiones que actúa en la capa límite) a la solución viscosa interna.

Sin embargo, esta aproximación normalmente no es válida para definir el flujo alrededor de un buque completo, aunque es de interés en apéndices y para evaluar los efectos viscosos en la zona de proa donde el campo de presiones mantiene una capa límite delgada adherida al casco. La solución interna puede determinarse cada vez con mayor grado de precisión, empezando por métodos integrales que sólo consideran cantidades medias dentro de la capa límite o, a través de formulaciones diferenciales que resuelven las ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes en forma parabólica.

El flujo externo puede considerarse como irrotacional y ser tratado por medio de modelos de flujos potenciales. Es de importante recordar el especial interés de las soluciones irrotacionales externas en el campo de la hidrodinámica del buque. Las olas no propagan la vorticidad, por lo que fuera de la estela viscosa, el flujo asociado con la propagación de las olas es irrotacional. En este sentido, el cálculo numérico de la resistencia por formación de olas puede obtenerse a través de modelos potenciales mejor que con otro tipo de formulaciones.

Los modelos que describen los efectos viscosos en presencia de separación de flujo (cuando la hipótesis de Prandtl no es válida) deben considerar los efectos de la turbulencia a través de formulaciones viscosas basadas en discretizaciones adecuadas de las ecuaciones de Navier-Stokes. En este caso, la aproximación más sencilla es la basada en la conocida "Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations". Estos modelos promedian el campo de las fluctuaciones de la turbulencia dando lugar al tensor de las tensiones de Reynolds. El mayor esfuerzo de modelización en este caso lo constituye una relación de las tensiones de Reynolds.

Se han desarrollado diferentes modelos, desde sencillas ecuaciones algebraicas hasta formas múltiples. De ahí que las soluciones obtenidas dependan de la "precisión" del modelo de turbulencia utilizado.

Actualmente, los modelos usados en CFD se pueden dividir en dos grandes grupos:

1. los que se basan en el flujo potencial.
2. los que utilizan el fluido viscoso.

Los métodos que simulan el perfil de la ola alrededor del casco para la determinación de la resistencia por formación de olas y para el estudio de la superficie libre, pertenecen al primer grupo. El segundo grupo incluye los métodos que estiman la resistencia de fricción, en algunos casos la resistencia total y las estelas.

1.3 Los 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 interfase 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 tenemos todas las variantes del conocido método de Dawson{1977} en el cual 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, existen en el mercado numerosos programas de ordenador, basados en la teoría de las superficies sustentadoras en tres dimensiones y que 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 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.

1.4 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 malla 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 minimización de los errores numéricos a través de estudios de convergencia y orden de exactitud constituyen la base de la verificación, mientras que 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, pasando de las aulas universitarias y Centros de Investigación a las Oficinas Técnicas.

Tendremos que distinguir entre verificación y validación:

- **Verificación:** La verificación de un programa de ordenador consiste en comprobar que dicho programa representa correctamente el modelo matemático que forma la base de éste.
- **Validación:** La validación es la demostración de que el programa de ordenador verificado representa adecuadamente la realidad física. Dentro de esta validación está la comparación de los valores analíticos con los experimentos obtenidos en un canal de ensayos.

“Datos” susceptibles de utilizarse en la validación de CFD:

- El correspondiente 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 fueron efectuados en dos geosims (modelos geoméricamente similares) 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%.

2. Mecánica de fluidos

La **Mecánica de fluidos** es la parte de la física que se ocupa de la acción de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de las aplicaciones y mecanismos de ingeniería que utilizan los fluidos. La mecánica de fluidos es fundamental en campos tan diversos como la aeronáutica, la ingeniería química, civil e industrial, la meteorología, las construcciones navales y la oceanografía.

La mecánica de fluidos puede subdividirse en dos campos principales: *la estática de fluidos o hidrostática*, que se ocupa de los fluidos en reposo, y *la dinámica de fluidos*, que trata de los fluidos en movimiento. El término de hidrodinámica se aplica al flujo de líquidos o al flujo de los gases a baja velocidad, en el que puede considerarse que el gas es esencialmente incompresible. La aerodinámica, o dinámica de gases, se ocupa del comportamiento de los gases cuando los cambios de velocidad y presión son lo suficientemente grandes para que sea necesario incluir los efectos de la compresibilidad.

2.1 Definición de fluido

En general, la materia puede clasificarse según las formas físicas en que se presenta, denominadas fases. Los fluidos comprenden las fases líquida, gaseosa y plasma de la materia.

Sin embargo, sabemos que los líquidos y los gases tienen aspectos completamente distintos; por ello, se busca una característica común que nos permita clasificarlos como fluidos: un fluido se deforma continuamente bajo esfuerzos cortantes (tangenciales), sin importar lo pequeños que éstos sean.

La distinción entre líquidos y gases se basa únicamente en las fuerzas intermoleculares. En los líquidos son tales que definen el volumen de la sustancia, pero no la forma. Los líquidos son muy poco compresibles. De hecho, a efectos prácticos, se consideran incompresibles. En los gases, las fuerzas intermoleculares son muy pequeñas, de manera que no se define ni volumen de sustancia ni forma. La densidad varía de forma considerable con la presión y la temperatura.

2.2 Propiedades de un fluido

En cada estado, la condición de la sustancia es única y está descrita por sus propiedades.

2.2.1 Densidad

Suele denotarse con la letra ρ , y es el cociente entre su masa y su volumen.

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

ρ = densidad (kg/m^3), m = masa (Kg), V = volumen (Kgm^3)

2.2.2 Viscosidad

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a la deformación cortante o angular.

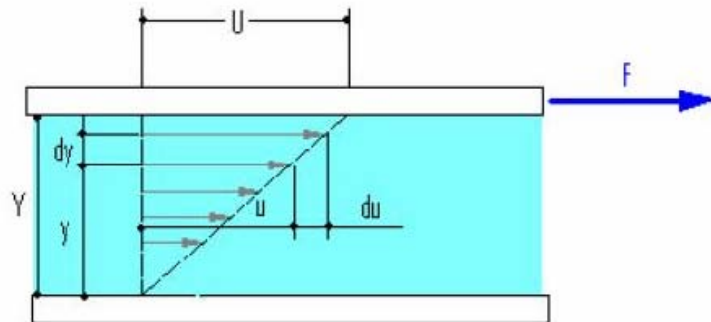


Ilustración 1: Fluido contenido entre dos placas

En la figura se muestra como la velocidad del fluido varía linealmente con la altura entre placas. Esta variación se denomina **perfil de velocidades**. Se ha demostrado en experimentos que una gran cantidad de fluidos en las condiciones anteriores cumplen la siguiente relación:

$$F \propto \frac{A * U}{Y}$$

Por semejanza de triángulos en la figura anterior U/Y se puede reemplazar por el gradiente de velocidades du/dy . Si se introduce ahora una constante de proporcionalidad, la viscosidad dinámica o absoluta μ , el esfuerzo cortante τ entre dos capas finas de fluido cualesquiera se puede expresar como:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu * \frac{U}{Y} = \mu * \frac{du}{dy}$$

2.2.3 Fuerzas y presión

En el estudio de las fuerzas en la mecánica de fluidos se consideran dos tipos fundamentales: fuerzas másicas y fuerzas superficiales.

Las **fuerzas másicas** son las fuerzas exteriores que actúan sobre el fluido sin contacto directo. Se suele referir a ellas como densidad de fuerza másica f ($\frac{N}{m^3}$) o fuerza másica específica g ($\frac{m}{s^2}$).

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{dFm}{dV} \\ g &= \frac{dF}{dm} \end{aligned} \right\} f = \rho * g$$

Las **fuerzas superficiales** son efectuadas sobre el contorno del fluido por el resto del fluido, por el recipiente o cualquier otra sustancia, mediante contacto directo.

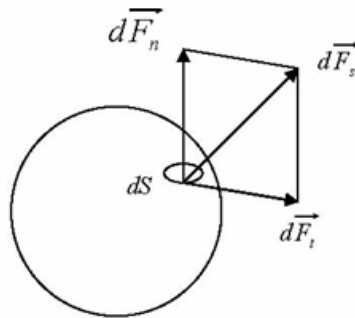


Ilustración 2: Fuerzas de superficie

Esfuerzo Normal	$\frac{N}{m^2}$	$\sigma_n = \frac{dF_n}{dS}$
Esfuerzo Cortante	$\frac{N}{m^2}$	$\tau_t = \frac{dF_t}{dS}$

Los fluidos en equilibrio están libres de esfuerzos cortantes, ya que son incapaces de resistirlos.

Los esfuerzos normales reciben el nombre de **presión**, fuerza por unidad de área.

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \text{presión} \left(\frac{N}{m^2} \right), F = \text{fuerza} (N), A = \text{área} (m^2)$$

2.3 Tipos de flujo

En general, cuando se habla de un flujo fluido, se refiere a un **fluido ideal**, el cual se considera sin viscosidad. En cambio, el **fluido real** se ve afectado por ésta, dando lugar a la aparición de esfuerzos cortantes entre partículas.

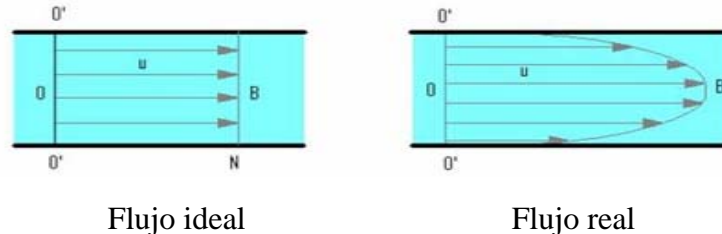


Ilustración 3: Perfil de velocidades

También se pueden clasificar los fluidos como **compresibles** o **incompresibles**.

En el flujo **incompresible** la densidad (ρ) es constante. Los líquidos se suelen considerar incompresibles.

Los gases son **compresibles**, su densidad es una función de la presión absoluta y de la temperatura absoluta, regida por la ecuación de los gases perfectos:

$$\frac{p}{\rho} = pv = RT$$

P = presión absoluta (Pa), ρ = densidad (Kg/m^3), v = volumen específico $1/\rho$ (m^3/Kg), R = constante del gas. En el caso del aire es de 287 (Nm/KgK),
 T = temperatura absoluta (K)

2.3.1 Clasificación de los flujos

2.3.1.1 Flujo estacionario y no estacionario

Se considera que un flujo es *estacionario* cuando sus propiedades son constantes a lo largo del tiempo, y *no estacionario* cuando varían a lo largo de éste.

2.3.1.2 Flujo laminar y turbulento. Número de Reynolds

Osborne Reynolds determinó que la transición de régimen laminar a turbulento era función de un único parámetro, el cual se conoce como Número de Reynolds. Este término es adimensional y es el producto de la velocidad v , la densidad del fluido ρ y la sección de paso del fluido D dividido entre la viscosidad del fluido μ .

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

Si el número de Reynolds es menor de 2100 el régimen es **laminar** y si es mayor el régimen es **turbulento**.

En el flujo **laminar el fluido** se mueve debido al *deslizamiento* de láminas de espesor infinitesimal sobre láminas adyacentes. A escala molecular, las partículas se mueven sobre líneas de corriente observables.

En el **flujo turbulento**, se puede observar en la figura (a) el movimiento irregular de las partículas en un breve instante de tiempo, mientras que en la (b) se muestra la trayectoria seguida por una partícula en un transcurso de tiempo mayor.

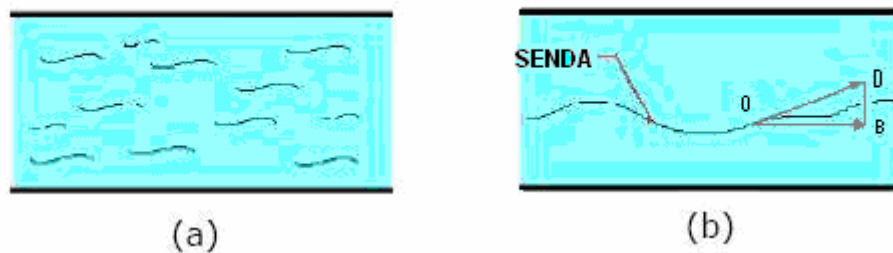


Ilustración 4: Movimiento de las partículas de un fluido (a), Trayectoria de una partícula fluida (b).

2.4 Aspectos teóricos de la Mecánica de Fluidos

En este apartado se describirán los fundamentos teóricos sobre los cuales se desarrollará el estudio de este proyecto.

2.4.1 Ecuación conservación de la masa

La conservación de la masa es un principio fundamental en mecánica de fluidos. Afirma que la masa no puede ser creada ni destruida, por lo que la masa de un volumen de control debe de conservarse.

$$p_1 A_1 v_1 = p_2 A_2 v_2$$

$$\rho = \text{densidad } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right), v = \text{velocidad } \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right), A = \text{sección de paso } (\text{m}^2)$$

Esto es lo que se denomina **ecuación de continuidad**.

2.4.2 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli relaciona la presión, elevación y velocidad de un flujo constante y no viscoso en un fluido incompresible. A medida que la velocidad de un fluido incrementa, su presión interna decrece. De manera que en cualquier punto de la

superficie del cuerpo a estudiar se obtiene una constante. La ecuación de Bernoulli se puede expresar de la siguiente manera:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante}$$

P = presión (Pa), ρ = densidad (Kg/m^3), v = velocidad (m/s), h = altura (m),
 g = gravedad (m/s^2)

2.4.3 Ecuaciones de Navier-Stokes

Son un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de un fluido para el caso general, teniendo en cuenta que las fuerzas actúan sobre un elemento infinitesimal.

Las **Ecuaciones de Navier-Stokes** son:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right]$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right]$$

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right]$$

Cuando las ecuaciones anteriores se utilizan para representar un fluido ideal ($\mu = 0$), éstas se ven reducidas a un conjunto de ecuaciones tridimensionales denominadas **ecuaciones de Euler**.

2.4.4 Capa Límite

La capa límite se describe como una capa muy fina de fluido adyacente a la superficie, donde la viscosidad es importante, mientras que el fluido fuera de esta capa se considera sin fricción o ideal.

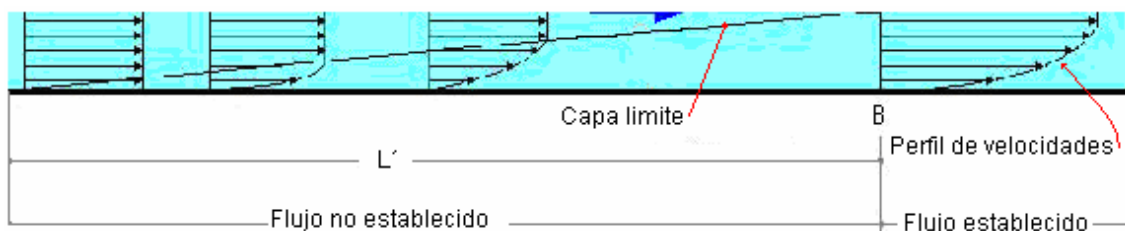


Ilustración 5: Evolución de la capa límite

La capa límite puede ser completamente laminar, o puede ser principalmente turbulenta con una subcapa viscosa.

Al comparar las capas límites laminar y turbulenta, se observa que la distribución de velocidades en la capa límite turbulenta muestra un gradiente de velocidades más pronunciado cerca de la superficie y un gradiente más plano en el resto de la capa. Entonces el esfuerzo cortante en la superficie es mayor en la capa límite turbulenta que en la laminar.

Cabe destacar una diferencia importante entre el flujo alrededor de cuerpos sumergidos (en particular nuestro casco) y flujo en tuberías. En el caso de las tuberías, las capas límites de las paredes opuestas de la tubería se unen de una cierta distancia y el flujo llega a ser todo capa límite, mientras que en el caso de coches, aviones, etc., la capa límite puede llegar a tener varios centímetros de espesor, pero será muy pequeño comparado con las dimensiones del volumen de control.

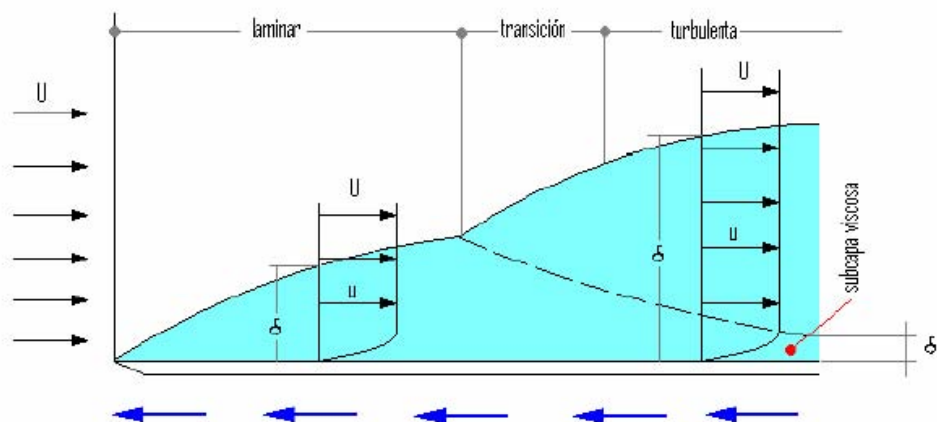


Ilustración 6: Capa límite y turbulenta a lo largo de una placa lisa

3. Tdyn

En este apartado se explican unas nociones básicas de Tdyn, las cuales serán ampliadas y adaptadas al caso del casco de un barco en los apartados correspondientes.

Tdyn es un programa para la simulación dinámica de fluidos, basado en la solución numérica de fluidos incompresibles y ligeramente compresibles mediante las ecuaciones de Navier-Stokes.

Tdyn incluye diferentes módulos para poder solucionar diferentes problemas:

- Transferencia de calor: módulo HEATRANS.
- Turbulencias: módulo RANSOL.
- Problemas de superficies libres: módulo NAVAL.
- Geometría, definición de datos, mensaje y procesamiento de los resultados de análisis: módulo PREPOST.

Los diferentes módulos están integrados dentro del entorno del programa,

siendo usado éste como uno solo.

El análisis de un problema mediante Tdyn consta de los siguientes pasos básicos:

1. PRE-PROCESO

- Creación (o importación) de la geometría a analizar.
- Asignación de propiedades: materiales, condiciones de límites y definición de datos.
- Generación del mallado.

2. CÁLCULO

3. POST-PROCESO

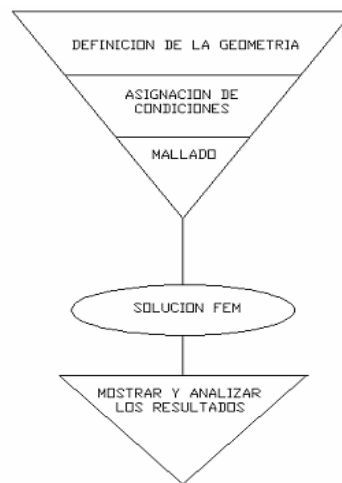


Ilustración 7: Pasos a seguir en el análisis de un problema de elementos finitos

3.1 Pre-proceso

Cuando se realiza un nuevo cálculo con Tdyn se debe especificar el tipo de problema. Esto se puede realizar en cualquier momento durante la creación de la geometría, pero antes de asignar condiciones, puesto que éstas podrían perderse.

3.1.1 Creación de la geometría (geometry definition)

Tdyn tiene capacidades gráficas, pero muy limitadas y suele ser más práctico importar la geometría a partir de un formato de transporte convencional ****.iges*, la cual se ha generado mediante un programa de CAD (*Rhinoceros* en nuestro caso).

En la creación de la geometría se generará una superficie o volumen de control, según si se quiere realizar una simulación 2D o 3D, respectivamente. El programa dispone de una potente herramienta de creación de superficies a partir de líneas o curvas y una herramienta para crear volúmenes a partir de superficies. Una vez creada la superficie o volumen de control debe definirse un origen de

coordenadas.

En general no es conveniente generar las superficies que van a definir el volumen de control con el programa elegido para la creación de la geometría (Rhinceros), ya que complica el proceso de importación y puede comportar un mayor número de errores en la definición de las superficies.

3.1.2 Condiciones (condition assignment)

Las condiciones son todas las propiedades de un problema, (excepto materiales y límites) que pueden ser asignadas a una entidad (punto, línea, superficie o sólido). Definiendo así las condiciones básicas de los límites de un problema.

Tdyn dispone de múltiples condiciones de contorno referentes a cada uno de los módulos disponibles. Sólo se ha hecho referencia a las opciones propias del RANSOL y del módulo NAVAL. Dentro de estas condiciones no se engloban las condiciones de contorno incluidas en las propiedades del fluido.

En Tdyn las condiciones se aplican a través de la opción del menú **Data>Conditions**.

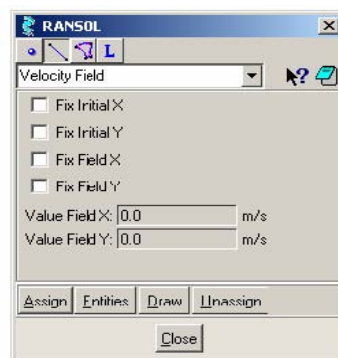


Ilustración 8: Asignación a una recta determinada de condiciones de un campo de velocidades

Nota: Si una malla no ha sido generada, cualquier cambio producido posteriormente en la asignación de las condiciones requiere mallar de nuevo el objeto a ensayar. Si no se genera de nuevo la malla, el sistema nos avisará que debemos hacerlo para poder continuar.

3.1.2.1 Fijar presión (fix pressure)

Esta opción permite asignar presión a elementos. En la mayoría de problemas se recomienda fijar la presión como mínimo a un punto, para establecer un valor de referencia. Cuando la presión no sea especificada en ningún punto del dominio, el programa trabaja por defecto con presiones relativas.

Si las condiciones en la entrada no son bien conocidas, es efectivo mover la frontera tan lejos como sea posible de la zona de estudio.

3.1.2.2 Fijar Velocidad (fix velocity)

Esta condición se asigna a las entidades geométricas o a las capas y se utiliza para fijar la velocidad en el valor dado.

Si las condiciones en la entrada no son bien conocidas, es efectivo mover la frontera tan lejos como sea posible de la zona de estudio.

3.1.2.3 Fijar vector velocidad (fix velocity component)

Esta condición es asignada a puntos, líneas y superficies; es usada para especificar el valor de la componente del vector velocidad.

3.1.2.4 Fijar la dirección de la velocidad (fix velocity direction)

Esta condición se asigna a las líneas y se puede utilizar para definir la dirección de la velocidad, según la orientación del sistema ortogonal.

3.1.2.5 Cambiar condiciones de la velocidad (remove velocity condition)

Esta condición se asigna a las entidades geométricas y a las capas, hace que el programa ignore cualquier especificación en el campo de la velocidad.

3.1.2.6 Campo de presiones (pressure field)

Esta condición se asigna a las entidades geométricas y se utiliza para fijar la presión en un punto a un valor dado por una función correspondiente del material fluido.

3.1.2.7 Campo de velocidad (velocity field)

Esta condición se asigna a las entidades geométricas y las capas, se utiliza para especificar la velocidad en el valor dado por la función correspondiente del material fluido.

3.1.2.8 Fijar turbulencia (fix turbulence)

Esta condición se asigna a las entidades geométricas y a las capas, se utiliza para fijar todas las variables de la turbulencia (solucionadas en el problema de la turbulencia) inicialmente (para $t=0$) el valor inicial es dado en la función correspondiente del material fluido.

3.1.2.9 Fijar gradiente nulo (fix null gradient)

Esta condición es asignada a puntos, líneas y superficies y es usada para

imponer un gradiente nulo a las variables del problema en la dirección dada.

3.1.2.10 Condiciones disponibles en el módulo Naval

Fix Beta: esta condición es asignada a entidades geométricas y capas. Se utiliza para fijar el valor de la elevación de la ola en su valor inicial. El valor inicial es la diferencia entre la coordenada OZ del punto y la altura de la superficie libre.

3.2 Materiales (materials)

Los materiales quedan definidos a través de la asignación de un grupo de propiedades.

Cualquier problema a la hora de determinar algún material puede resolverse haciendo uso de la base de datos de la cual dispone el programa. El usuario también puede crear nuevos materiales derivados de los ya creados y también asignarlos.

Si la malla se ha generado ya, es necesario mallar otra vez o asignar los materiales directamente a la malla, al cambiar los materiales asignados.

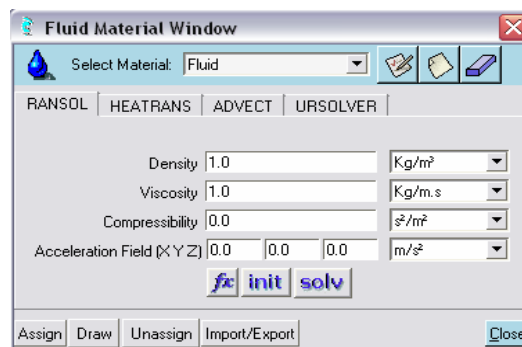


Ilustración 9: Asignación de propiedades fluidas

3.2.1 Material del Fluido (Fluid material)

Son un grupo de propiedades físicas y otros datos que pueden ser asignados a superficies (2D) o a volúmenes (3D). Este sistema de características físicas corresponde al fluido a ser analizado.

Opciones disponibles en el módulo RANSOL

- **Densidad:** Densidad del fluido. Puede ser una constante o una función.
- **Unidades de la densidad:** unidades de la densidad definidas en un campo previo.
- **Viscosidad:** viscosidad del fluido, puede ser una constante o una función.

- **Unidades de la viscosidad:** unidades de la viscosidad definidas en un campo previo.
- **VelX Field/ VelY Field/ VelZ Field:** cualquier condición de Campo de Velocidad asignado a alguna entidad dentro de este material, este campo se usará como la base para calcular las condiciones de contorno.
- **Pres Field:** Presión inicial y de referencia en el campo de presión dinámico. Puede ser una constante o una función. Si se pone a 0, se trabajará con presiones relativas.
- **Kenr Field:** campo inicial de la energía cinética del vortice (energía cinética del componente fluctuante de la velocidad). En algunos casos puede ser útil definir este campo como una función llamada nivel de la intensidad de turbulencia o TIL (turbulence intensity level), definida por la relación: $k = TIL * V^2$, donde k es la energía cinética del vortice y V es el campo de velocidad.
Puede ser una constante o una función.
- **Elen Field:** campo inicial y de referencia de la escala de longitud turbulenta, definida por la relación: $\mu_T = \rho * k^{\frac{1}{2}} * L$; donde K es la energía cinética del vortice; μ_T es la viscosidad del vortice y ρ es el campo de densidad.
Puede ser una constante o una función

$$L = \frac{\mu}{\rho * TIL^{\frac{1}{2}} * V} \left[\frac{\mu_T}{\mu} \right]^*$$

- **Acc OX/OY/OZ:** aceleración externa (no gravitacional) que actúa sobre el fluido (en la componente OX/OY/OZ).
Puede ser una constante o una función.

3.2.2 Cuerpo fluido (Fluid Body)

Los límites fluidos del cuerpo son grupos de condiciones límite, de características geométricas y de otros datos, que identifican un cuerpo como límite de un líquido para el análisis.

Estas propiedades pueden ser asignadas a superficies (2D) y volúmenes (3D).

Permite escoger el tipo de límite de la pared:

- **InvisWall:** Vector normal a la velocidad es cero.
- **V_fixWall:** Impone la condición de velocidad nula en el límite del contorno del fluido, es decir, en la pared.

- **None_Wall:** Ninguna condición será aplicada al contorno.
- **RoughWall:** La ley de la condición de la pared teniendo en cuenta la rugosidad de la pared, es aplicada a la distancia de la pared δ . La tensión fluida (la tracción) dada por la ley de la pared a una distancia δ se aplicará como condición en el solver fluid.
- **DeltaWall:** la ley de la condición de la pared se aplica en el límite a la distancia de la pared δ . La tensión fluida (la tracción) dada por la ley de la pared a una distancia δ se aplicará como condición en el solver fluid.

La distancia de la pared se debe insertar en el campo **Delta**

Si se selecciona **Deltawall**, la asunción de la ley de la pared se toma hasta la distancia dimensional δ de la pared especificada aquí.

- **YplusWall:** la ley de la condición de la pared se aplica en el límite en la distancia adimensional de la pared y^+ . La tensión fluida (la tracción) dada por la ley de la pared a una distancia adimensional y^+ se aplicará como condición en el solver fluid.

La distancia adimensional de la pared se debe insertar en el campo **Yplus**

Si se selecciona **Yplus**, la asunción de la ley de la pared se toma hasta la distancia adimensional y^+ de la pared especificada aquí.

- **Cw_U2Wall:** tracción dada por $C_w * V^2$, donde C_w es una constante y V es la velocidad del fluido impuesta en el límite.
- **ITTC Wall:** la ley de la condición de la pared se aplica en el límite en la distancia adimensional de la pared y^+ . La tensión fluida (la tracción) dada por la ley de la pared a una distancia adimensional y^+ se aplicará como condición en el solver fluid.

Esta tracción es corregida de acuerdo con la ley de fricción de la ITTC 57.

- **OutFBound:** la herramienta de tdyn de una condición límite libre y se aplica al límite.

3.2.3 Límites (boundaries)

Los límites son grupos de condiciones de demarcación, propiedades de geometría y otros datos que identifican los límites del análisis.

Existe también una base de datos que puede usarse para la definición de los límites del análisis. El usuario también puede crear nuevos límites a partir de los existentes y asignarlos también.

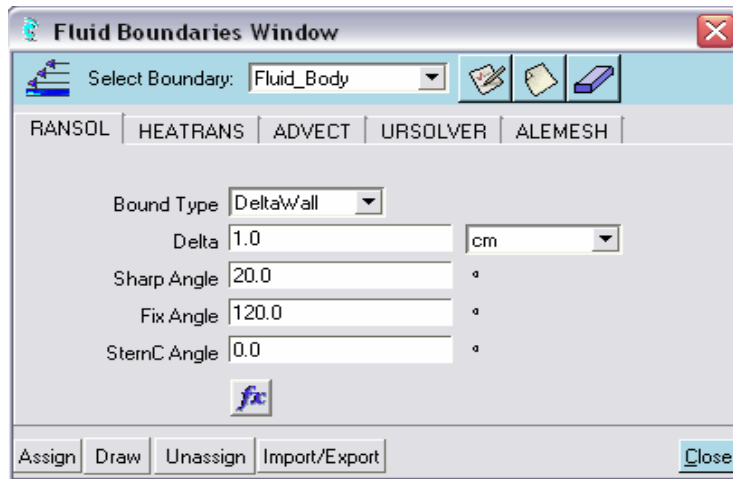


Ilustración 10: Asignación de límites

3.2.4 Datos del problema (problem data)

Los datos del problema es toda la información requerida para llevar a cabo el análisis que no tratan de ninguna entidad geométrica en especial. Esto es diferente de las definiciones previas de condiciones y las propiedades de materiales, que son asignadas a entidades diferentes. Algunos ejemplos de los datos del problema generales son el tipo de solución algorítmica usada junto al programa de resolución, el valor de los incrementos de tiempos entre los pasos, las condiciones de convergencia, etc.

Los datos del problema están organizados en tres grupos diferentes:

- Problema:

Este grupo de datos hace referencia a toda la información requerida para definir el problema que va a ser analizado y no trata de ninguna entidad geométrica en particular.

- Programa de resolución:

Este grupo de datos se refiere a toda la información requerida para definir la integración y resolver los datos del problema a analizar.

- Unidades:

Este grupo de datos hace referencia a todas las unidades generales requeridas para identificar los datos del problema.

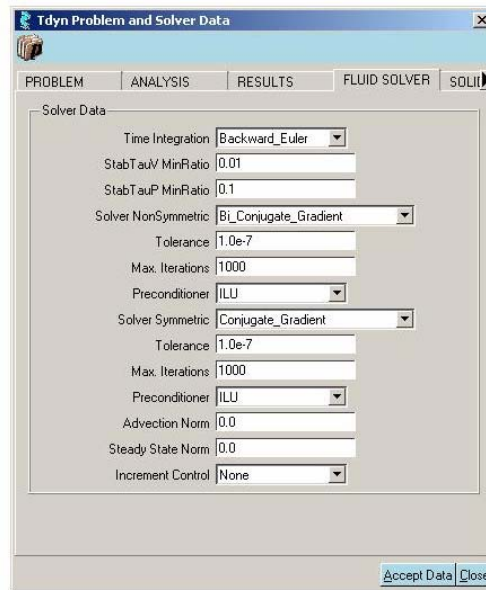


Ilustración 11: Parámetros de análisis para la resolución del cálculo.

3.2.5 Generación de la malla (mesh generation)

La generación de la malla permite una fácil definición del tamaño de los elementos y características de la malla para el análisis.

La asignación del tamaño de los elementos generados en el paso del mallado es de importancia crítica. Los elementos demasiado grandes pueden conducir a los malos resultados, mientras que los elementos demasiado pequeños pueden aumentar dramáticamente el tiempo de cómputo sin mejorar la calidad del resultado.

Para generar la malla se puede acceder por la opción del menú **Utilities>Tdyn Wizard>Generate Mesh**. También puede iniciarse esta generación mediante el icono correspondiente.



Ilustración 12: Icono generación de malla

3.3 Cálculo (calculate)

Después de implementar el problema dentro del módulo de pre-proceso, el cálculo puede iniciarse desde dentro de este módulo.

A través de la ruta **Calculate>Calculate Window** se puede empezar el proceso de solución. Cuando presionemos el botón **Start** en la ventana de cálculo, Tdyn empezará el cálculo. También puede iniciarse este proceso por medio del icono correspondiente.



Ilustración 13: Icono inicio del cálculo

La información correspondiente sobre la evolución de la resolución puede ser observada presionando el botón de visualización del producto.



Ilustración 14: Icono información de la evolución de la resolución

3.4 Post-proceso (post-processing)

Cuando el proceso de cálculo de Tdyn ha terminado, el sistema muestra el siguiente mensaje: *Process...name..., started on...date...has finished*. Los resultados pueden visualizarse seleccionando la ruta **Files>Postprocess**.

Hay que hacer notar 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 queremos acabar el proceso), se responde negativamente.

Cuando el problema está cargado en el módulo de PREPOST, y la opción **Files>Post-process** está seleccionada, el archivo de resultados será cargado en la parte de post-procesamiento del módulo.

Los resultados que se pueden observar dentro del post-procesamiento básicamente son las presiones y las velocidades para cada tiempo-paso (a cada paso se le ha asignado un incremento de tiempo).

Los resultados pueden visualizarse usando opciones como girar el elemento, usar rellenos de contorno, curvas de nivel, iso-superficies, gráficos, etc.

3.5 Tdyn Wizard

Tdyn Wizard es una herramienta que ayuda a la definición y el análisis del problema en 8 fáciles pasos.

Esta herramienta, guía al usuario por las diferentes partes del proceso de análisis: definición de la geometría, generación del volumen de control, asignación de los datos del problema, mallado, visión de resultados y graficas, y presentación de informes.

A Tdyn Wizard se puede acceder a través de **Utilities→Tdyn Wizard→ Tdyn Wizard**.

3.5.1 Pasos preeliminares

El primer paso a realizar es la realización de la generación de la geometría según las capas estándar

Tdyn Wizard ayuda a generar fácilmente un volumen de control alrededor de cuerpo o los cuerpos, asignar los datos principales, generar una malla y realizar la simulación, también ayuda en el post-proceso y en la generación de informes de los resultados.

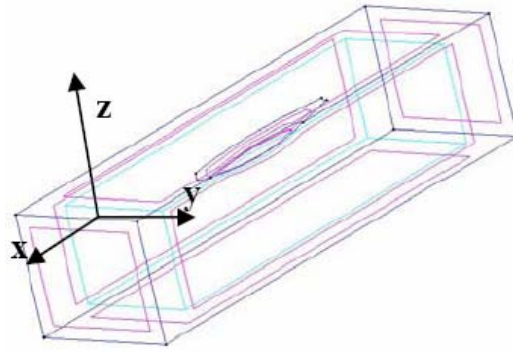
Para que Tdyn Wizard entienda el problema la geometría del cuerpo debe ser dividida en las diferentes capas que se explican a continuación.

Las capas dividen el dibujo reduciendo la complejidad visual y facilitando la visualización de los resultados obtenidos. Cada entidad puede pertenecer solamente a una sola capa:

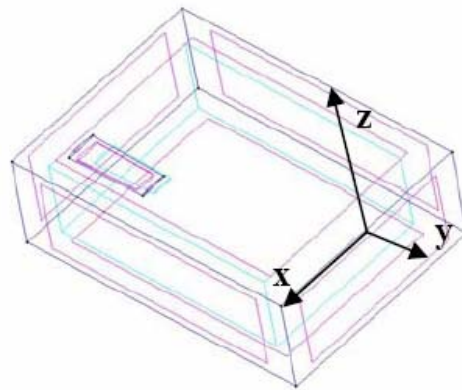
- **body_wet layer:** las superficies del cuerpo en contacto con el líquido, se asignarán a esta capa.
- **body_dry layer:** las superficies y líneas del cuerpo que no están en contacto con el fluido, se asignarán a esta capa. Si es necesario la superficie del cuerpo puede ser dividida por la línea de flotación inicial. Esta capa sólo se usará en los casos tipo 1 y 3 de los que es capaz de resolver Tdyn Wizard.
- **free_surf layer:** las líneas del cuerpo pertenecientes a la superficie libre, se asignarán a esta capa. Si es necesario esta línea se creará con la intersección de las superficies del cuerpo con la superficie libre. Esta capa sólo se usará en los casos tipo 1 y 3 de los que es capaz de resolver Tdyn Wizard.
- **symm_oy:** las líneas del cuerpo que pertenecen al plano de simetría y que estén por debajo de la flotación, se asignarán a esta capa. Esta capa sólo se usará en los casos tipo 1 y 2 de los que es capaz de resolver Tdyn Wizard.

3.5.2 Diferentes casos a resolver con Tdyn Wizard

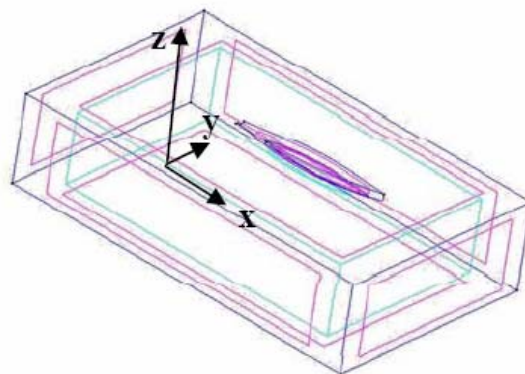
Caso1: cuerpo flotante semi-sumergido con superficie libre. Geometría y condiciones límite con simetría en el plano $y = y_0$. Flujo principal en la dirección +x o -x. Módulos Ransol y Naval requeridos



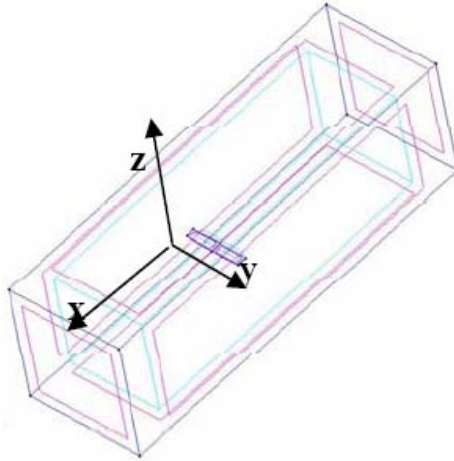
Caso 2: cuerpo sumergido sin superficie libre. Geometría y condiciones limite con simetría en el plano $y = y_0$. Flujo principal en la dirección $+x$ o $-x$. Módulo Ransol requerido



Caso 3: cuerpo flotante semi-sumergido con superficie libre. Geometría y condiciones limite sin simetría, Flujo principal en la dirección $+x$ o $-x$. Módulos Ransol y Naval requeridos



Caso 4: cuerpo sumergido sin superficie libre. Geometría y condiciones limite sin simetría. Flujo principal en la dirección $+x$ o $-x$. Módulo Ransol requerido.



Se puede acceder a la ventana de las capas a través del menú **Utilities** → **Layers** o mediante el icono correspondiente a las capas.



Ilustración 15: Icono capas

Al trabajar con la capas se presentan las opciones que normalmente tiene cualquier programa de dibujo tales como: New; Layer to use; Delete; Rename; Send to.

3.5.3 Creación del volumen de control (create control volume)

La ventana de creación del volumen de control permite de forma fácil la creación y definición del volumen de control en la mayoría de los casos.

Seleccionar las dimensiones del volumen, insertar los extremos aguas arriba y aguas abajo y presionar OK.

El volumen de control se va a orientar según los ejes cartesianos de coordenadas y por tanto el cuerpo debe estar orientado de acuerdo con estos ejes.

X factor: define la longitud X del volumen de control. Esta dimensión es definida por las zonas aguas arriba y aguas abajo. $Long X = (1.0+fore+aft) * length$.

Y factor: define la longitud Y del volumen de control.

Z factor: define la longitud z del volumen de control.

Length(longitud del cuerpo): se calcula con los datos de los puntos que se describen abajo.

Referente fore point: punto de referencia aguas arriba de la capa body_wet. Si es posible debe estar en el plano de simetría y en la línea de flotación.

Referente aft point: punto de referencia aguas debajo de la capa body_wet. Si es posible debe estar en el plano de simetría y en la línea de flotación.

Para acceder a la ventana de la creación del volumen se puede hacer a través de: **Utilities**→**Tdyn Wizard**→**Control Volume**.

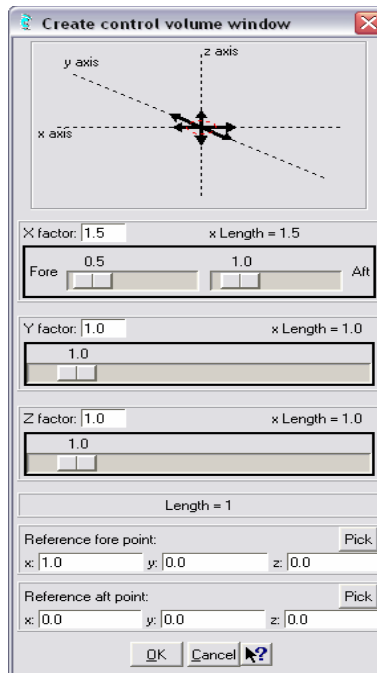


Ilustración 16: Creación del volumen de control

3.5.4 Definición de los datos (define data)

Esta ventana permite de manera cómoda definir los datos básicos para el análisis en la mayoría de los casos.

Al menos la velocidad, densidad, viscosidad y la longitud con sus unidades correspondientes deben ser fijadas.

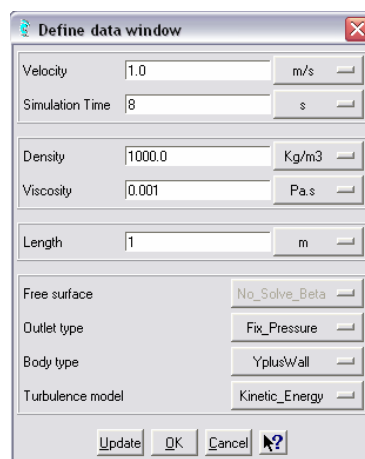


Ilustración 17: Definición de los datos

Velocity: velocidad del flujo libre del problema. La muestra de este valor debe indicar la velocidad relativa del flujo respecto al cuerpo.

Simulation time: tiempo total de la simulación. Un valor recomendado del tiempo de la simulación para alcanzar el estado constante puede ser calculado al presionar el botón Update después de insertar el resto de los datos.

Density: densidad del fluido.

Viscosity: viscosidad del fluido.

Length: longitud del cuerpo. Este valor se calcula automáticamente y si es posible, debe utilizarse el valor recomendado por el programa.

Free Surface: si se define una superficie libre, se puede elegir entre resolverla iterativamente y no actualizarla.

Outlet type: define las condiciones límite en la salida.

Body_type: tipo de pared (condición de límite) del cuerpo.

Turbulence model: tipo de modelo de turbulencia a usar.

Update: actualiza los datos de la ventana

Tras presionar el botón OK, se realizan de manera automática las siguientes acciones:

1. **Material Auto_Fluid:** es creado de forma automática a partir de los datos. Este material es asignado al volumen.
2. **Boundary Auto_Body:** es creada con los datos insertados. Este límite es asignado a la capa Body_wet.
3. Se define el límite de la superficie libre.
4. Las condiciones límites en la entrada, salida y paredes laterales son impuestas.
5. Los datos generales del problema son definidos.
6. Se definen las unidades.

Se puede acceder a la ventana de definición de datos a través del menú: **Utilities**→**Tdyn Wizard**→**Define data**

Una vez la definición de los datos a sido completada, presionar Next para continuar con la generación de la malla.

3.5.5 Generación de la malla (generate mesh)

La ventana de generación de malla permite de forma fácil la definición del tamaño de los elementos y de las características de la malla para el análisis de los casos más comunes, se puede usar los tamaños de malla por defecto o insertar nuevos valores.

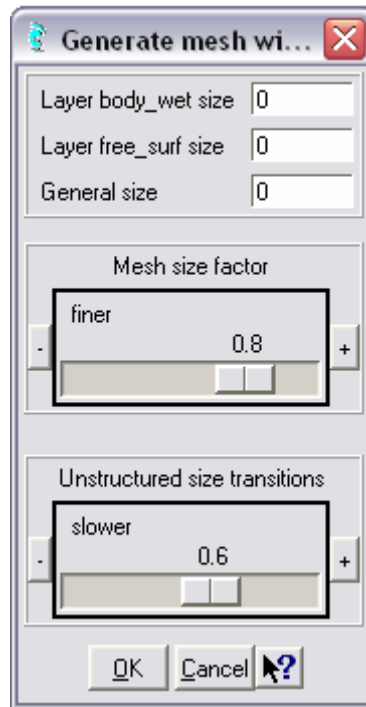


Ilustración 18: Generación de malla

Layer Body_wet size: tamaño medio para los elementos no estructurados de la capa Body Wet. Si se da un valor negativo, no se hace caso a este valor.

Layer Free_surf size: tamaño medio para los elementos no estructurados de la capa Free Surface. Si se da un valor negativo, no se hace caso a este valor.

General size: tamaño medio para los elementos no estructurados, serán aplicados al resto de líneas, de superficies y volúmenes que no tienen un tamaño previamente definido del elemento.

Mesh size factor: factor del tamaño de la malla, controla si la malla es más gruesa o más fina, basado en los criterios estándar. Un mayor factor del tamaño de malla genera una malla más gruesa.

Unstructured size transitions: controla si las transiciones entre diversos tamaños del elemento son lentas o rápidas

OK: se genera la malla, esto lleva algún tiempo

Se puede acceder a la ventana de generación de malla a través del menú: **Utilities**→**Tdyn Wizard**→**Generate mesh**.

Si todos los pasos anteriores han sido completados de manera correcta, el problema está preparado para ser calculado.

3.5.6 Cálculos (*calculate*)

Si es necesario se pueden modificar los datos del problema previamente al cálculo, pero cualquier modificación que se realice en las condiciones de contorno o en la asignación de materiales llevan consigo la necesidad de realizar un nuevo mallado.

Antes de lanzar el cálculo **guardar** el problema.

La ventana de proceso ofrece los siguientes comandos

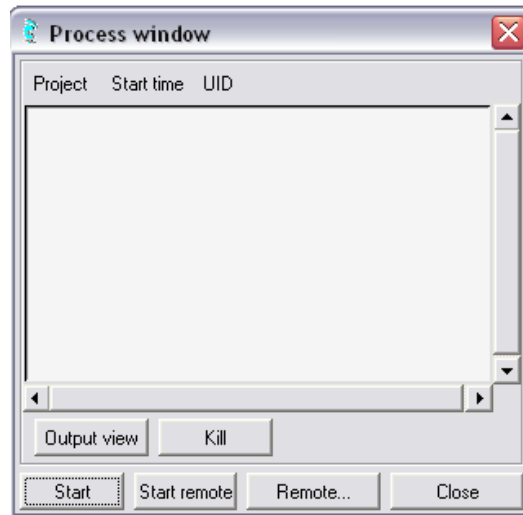


Ilustración 19: Ventana de proceso

Start: comienza el proceso de cálculo. Una vez puesto en marcha el usuario puede seguir trabajando con GID de forma normal.

Kill: después de seleccionar un proceso que esté en marcha, este botón para su ejecución.

Output view: después de seleccionar un proceso que esté en marcha, este botón abre una ventana que muestra la información referente al proceso como: las iteraciones, convergencia, etc.

Close: cierra la ventana pero no para el proceso de cálculo.

La información sobre el progreso de la solución puede ser exhibida presionando el botón *Output View*. También es posible dibujar una grafica de la evolución de las fuerzas en el cuerpo.

Se pueden realizar también los comandos anteriores usando los botones estándar de la barra de herramientas de Tdyn.



Ilustración 20: Icono calculate



Ilustración 21: Icono Output view



Ilustración 22: Icono Stop



Ilustración 23: Icono Draw forces on Bodies

La ventana de cálculo con sus comandos puede abrirse a través de: **Calculate**→**Calculate Window**.

Antes de que el proceso de cálculo haya concluido se pueden ver resultados intermedios seleccionando: **Files**→**Postprocess**.

3.5.7 Post-proceso (Post-processing)

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

Dos ventanas permiten administrar más opciones de visualización de resultados.

1. **View results:** permite al usuario elegir los resultados a presentar y la forma de presentación.
2. **Select and display style Windows:** permite al usuario elegir qué elementos de la malla deben ser post procesados y cómo se presentarán los resultados.

Los siguientes comandos están disponibles en la ventana de **View Results**.

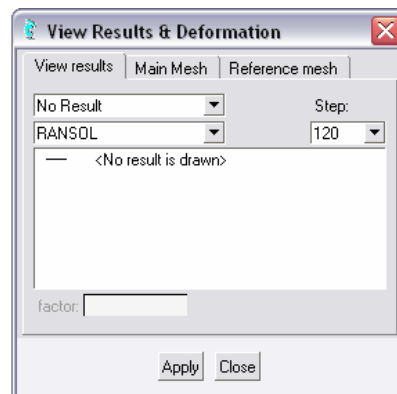


Ilustración 24: Resultados

Analysis: los resultados son agrupados en los diferentes módulos de Tdyn (Ransol; Heatrans; Advect and Naval).

Steps: se puede seleccionar qué análisis y pasos son exhibidos.

View: puedes seleccionar el tipo de visualización. Para dejar de ver un resultado, simplemente seleccionar la opción *No Result* en la ventana.

Results: define los resultados a visualizar.

Los siguientes comandos están disponibles en la ventana **Select & Display Style**.

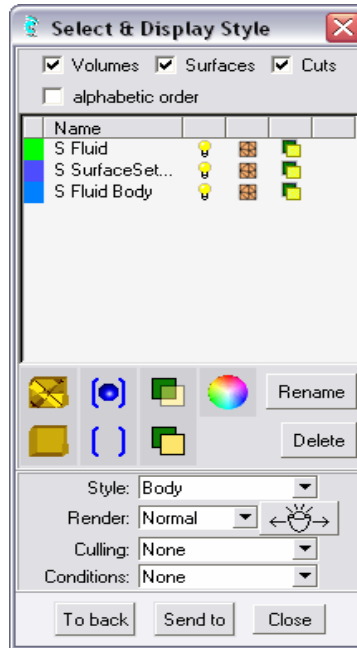


Ilustración 25: Select and display style

Puedes seleccionar volúmenes, superficies y/o cortes, activarlos (on), desactivarlos (off), o borrarlos después de confirmarlo.

El nombre de las mallas corresponde a los materiales y límites definidos.

Style: define como deben ser dibujados los volúmenes, superficies y cortes.

Render: define el tipo de visualización de malla.

-*Normal:* ninguna iluminación.

-*Flat:* con iluminación en los bordes.

-*Smooth:* iluminación con bordes alisados.

Culling: define si la cara de adelante, la de atrás, o la de adelante y atrás son transparentes. Esta opción se usa para mirar dentro de un volumen mallaado.

Conditions: las condiciones se pueden ser dibujadas si están presentes en la parte de proceso, no sólo condiciones geométricas sino también condiciones de malla.

3.5.8 Gráficas (making graphs)

Se pueden dibujar graficas de manera sencilla usando la ventana View Graphs, ésta permite seleccionar la variable y la línea para definir la grafica, puede abrirse a través de **Windows → Border graph**

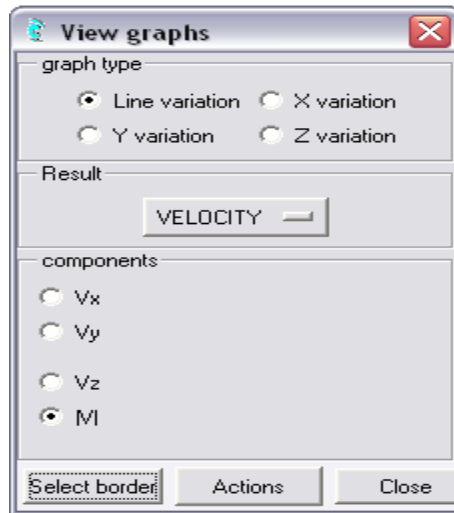


Ilustración 26: Visualización de graficas

Seleccionar el tipo de variación (eje X de la gráfica).

Seleccionar la variable a dibujar (eje Y de la gráfica).

Seleccionar la componente del vector a ser dibujada.

Action: enseñar o borrar la gráfica.

Select border: selecciona la línea que define la variación del eje X.

Mientras que los gráficos se visualizan sobre una sección transversal solamente, se tiene que proceder a cortar la malla en la posición deseada. Para realizar un corte se puede hacer siguiendo la secuencia de menú siguiente: **Do Cuts**→**Cut Plane**→**2 points** o **Do Cuts**→**Cut Plane**→**3 points**.

Esta opción permite definir el plano de corte con dos (el plano del corte entonces será perpendicular a la visión dibujada en pantalla) o tres puntos.

Seleccionando los nodos de la malla puedes introducir puntos, aunque también puedes hacerlo con el ratón o mediante las coordenadas de los puntos.

En la ventana Select and display style los resultados del corte aparecerán definidos junto a los otros sistemas como cut1, cut2, etc.

Todas las entidades puede ser puestas en "on" o en "off".

Dejando solamente en "on" los cortes, se puede trazar y visualizar los resultados sobre la sección transversal seleccionando el correspondiente corte dentro la ventana View graphs.

3.5.9 Informes (reporting)

Tdyn incluye una herramienta para crear fácilmente informes básicos de los resultados obtenidos en el análisis, se puede acceder a esta herramienta a través de **Utilities**→**Create Report**, esta herramienta generará un archivo *html* con el nombre del problema estudiado.

Los siguientes comandos están disponibles en la ventana Create Report.

Title: título del informe.

Description: insertar una descripción del análisis realizado, ésta aparecerá en el informe debajo del título.

Create: crea un nuevo informe del análisis.

View: muestra una visión del informe creado.

Export: exporta el informe como un archivo *html*.

Caption: cuando se introduce una imagen mediante el botón *Insert*, lo que pongamos en este apartado aparecerá bajo la foto describiendo lo que es.

Insert: inserta la vista actual del modelo en el final del informe.

Edit text: permite al usuario modificar el texto del informe.

Insert: inserta el texto modificado al final del informe.

Delete last: elimina el último texto insertado en el informe.

4. Viabilidad de un caso práctico

En este apartado se realiza una descripción de todos los pasos a seguir para llevar a cabo un estudio mediante la utilización de esta herramienta, desde el diseño de la geometría, incluyendo el diseño de los bulbos, hasta las condiciones de contorno a aplicar.

El estudio consiste en tratar de optimizar las formas de un barco ya existente que no dispone de bulbo mediante el acople de dos.

En primer lugar se ensayará el modelo original y se analizarán los resultados obtenidos, posteriormente se le acoplarán dos bulbos 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 como los ensayados, o sería mejor dejarlo con las formas originales.

4.1 Diseño de la geometría

El diseño de la geometría se realiza a partir del plano de formas del barco. Se utiliza un programa de diseño CAD para la realización de la superficie del casco y de los bulbos a ensayar.

4.1.1 Generación de la geometría

El primer paso ante un problema de este tipo es la definición de la geometría a tratar.

En este caso la geometría a tratar es el casco de un pesquero de dimensiones:

Eslora	19.960 m
Eslora entre perpendiculares	15.980 m
Manga	5.900 m
Puntal	2.650 m
Separación entre secciones	1.598 m
Separación entre líneas de agua	0.500 m
Separación entre longitudinales	1.000 m
Asiento de proyecto	1.500 m

Inicialmente los datos de los que se disponen es el plano de formas del barco en Autocad.

Para la realización de la superficie del casco se utiliza Rhinoceros.

Para ello, se importa a Rhinoceros cada una de las vistas del plano de formas de forma independiente, y se giran según la forma más adecuada y escaladas según las dimensiones del barco.

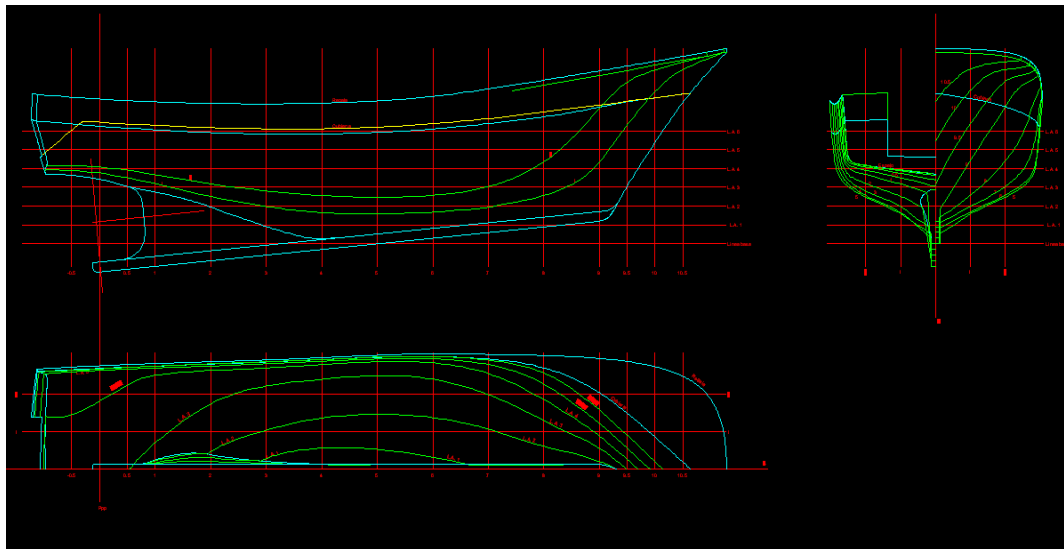


Ilustración 25: Plano de formas

Una vez se disponga de cada una de las vista por separado (en archivos de Autocad), se importan a Rhinoceros.

La importación del archivo de Autocad a Rhinoceros no suele dar ningún problema ya que Rhinoceros admite gran cantidad de formatos.

4.1.2 Importación de la geometría

Una vez el archivo se ha importado, pueden presentarse algunos problemas en lo concerniente al tamaño y posición del dibujo.

En este caso se observa que el tamaño del dibujo es mucho mayor que el espacio que Rhinoceros tiene destinado al dibujo, y que al importarlo se presenta en una posición inadecuada.

Para solucionar estos problemas simplemente hay que escalar y girar el dibujo.

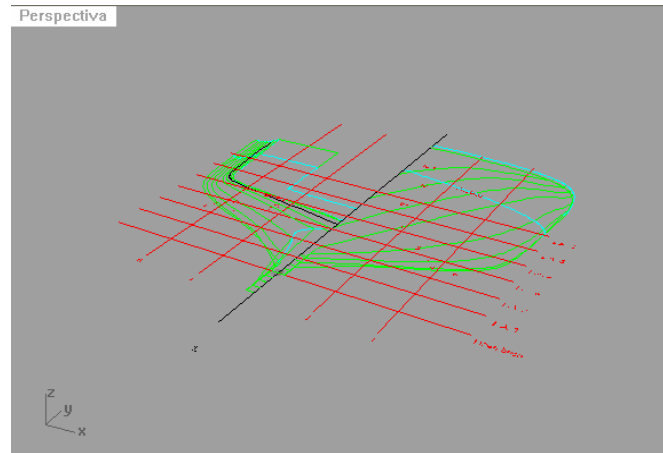


Ilustración 26: Caja de cuadernas

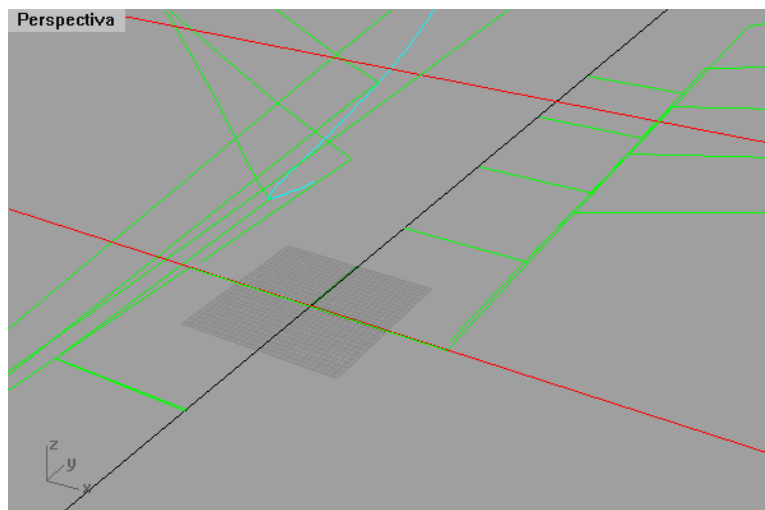


Ilustración 27: Detalle del tamaño destinado al dibujo por Rhinoceros y el tamaño del dibujo

Escalado: El escalado se hace a partir de alguna de las dimensiones conocidas del barco, en este caso la separación entre líneas de agua (0,500 m).

Girar: se gira el dibujo para ponerlo en posición adecuada, en este caso se gira dos veces (ambas 90 grados), una para ponerlo en posición vertical (giro alrededor del eje X) y la otra para orientarlo según el eje más conveniente, en este caso el eje Z.

Detalle del sistema de coordenadas y orientación del dibujo

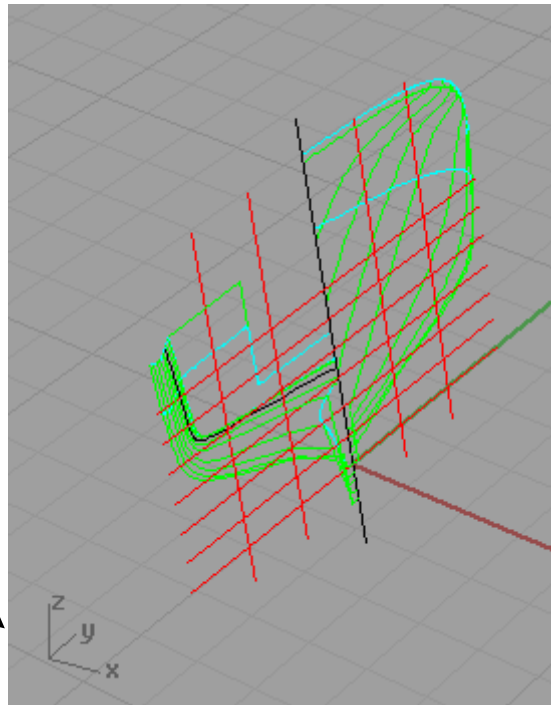
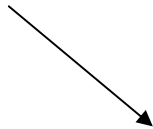


Ilustración 28: Caja de cuadernas girada y escalada

Se hace lo mismo con la vista de perfil y planta para obtener el siguiente dibujo.

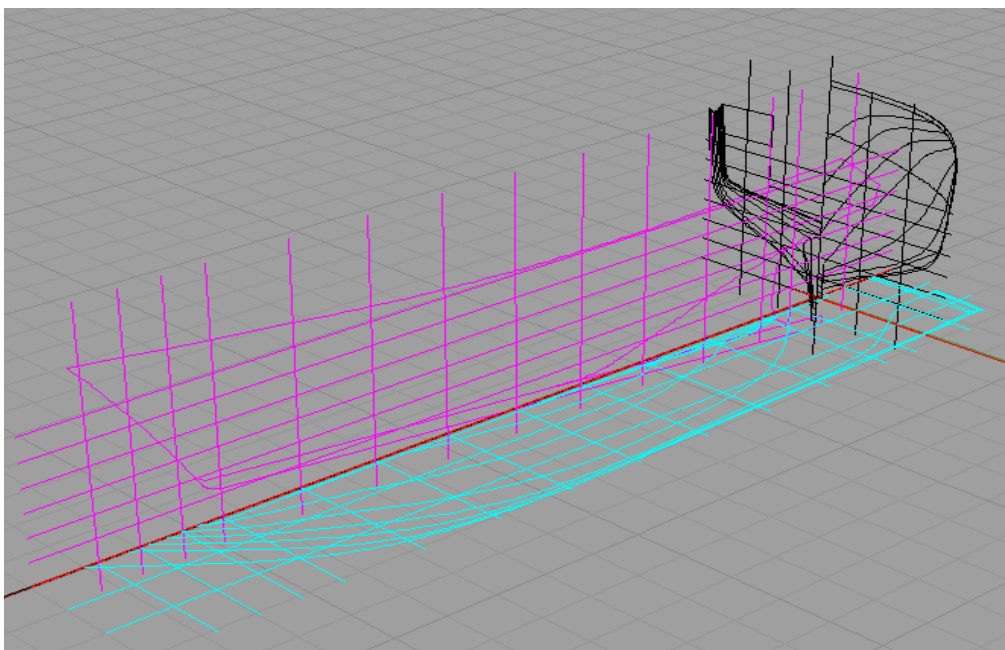


Ilustración 29: Vistas de alzado, planta y perfil, escaladas y giradas según los ejes más convenientes

4.1.3 Generación de la superficie del casco

La realización de la superficie del casco lleva consigo una serie de pasos previos y consideraciones a tener en cuenta.

Para realizar la superficie del casco hay que tener en cuenta que se hará en dos partes, por un lado la superficie del casco y por otro lado la superficie del quillote y quilla, ya que éste tiene una geometría más complicada.

Para la definición de la superficie del casco se llevan todas las cuadernas a su verdadera posición y se cortan a la altura de la línea de flotación, (posteriormente se cortará al calado de estudio correspondiente, ya que será la única parte a tener en cuenta en el estudio hidrodinámico del casco); también cortaremos la parte de las cuadernas que describen el quillote y quilla (para hacerlas por separado).

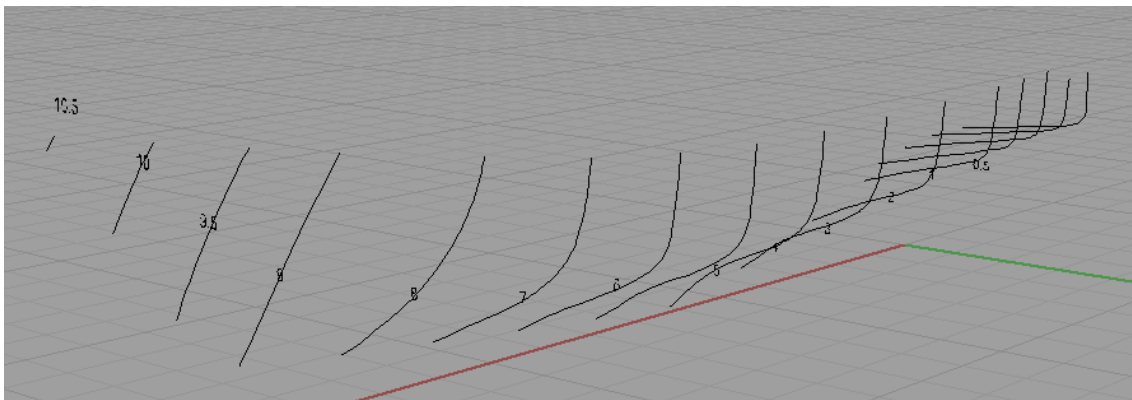


Ilustración 30: Cuadernas en verdadera posición cortadas por línea de flotación y sin quillote

A la hora de realizar la superficie del casco pueden presentarse algunas zonas que requieran ser alisadas, estas se alisarán con las diferentes herramientas de alisado de las que dispone Rhinoceros.

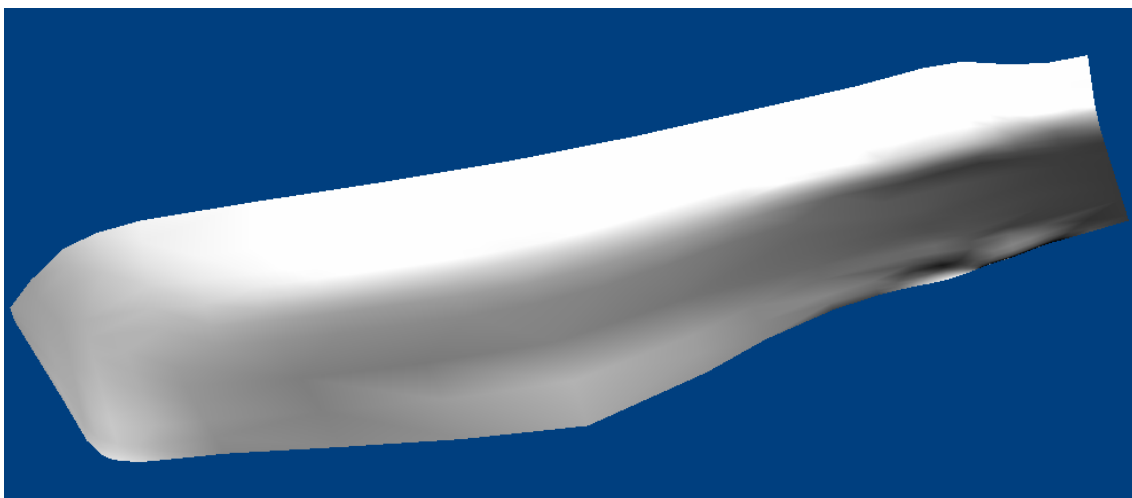


Ilustración 31: Superficie del casco con zona para alisar en popa

Para realizar la superficie del quillote y de la quilla hay que llevar a su

posición aquellas partes que han sido rechazadas al realizar la superficie del casco.

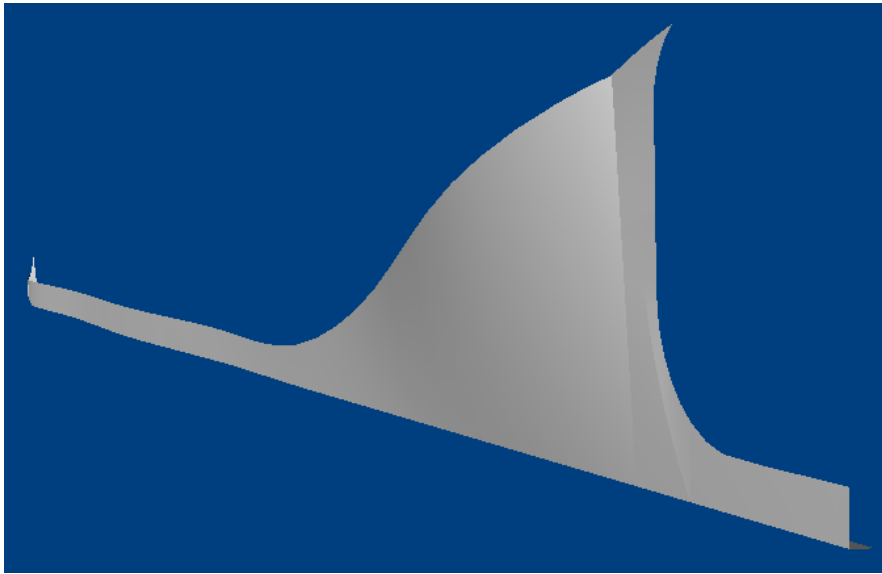


Ilustración 32: Superficie del quillote y quilla

Por último sólo queda unir ambas partes para obtener el barco final, el cual se a de cortar por el calado y asiento correspondientes al estudio hidrodinámico a realizar.

En este caso el asiento será nulo y el calado será el correspondiente a dos metros.

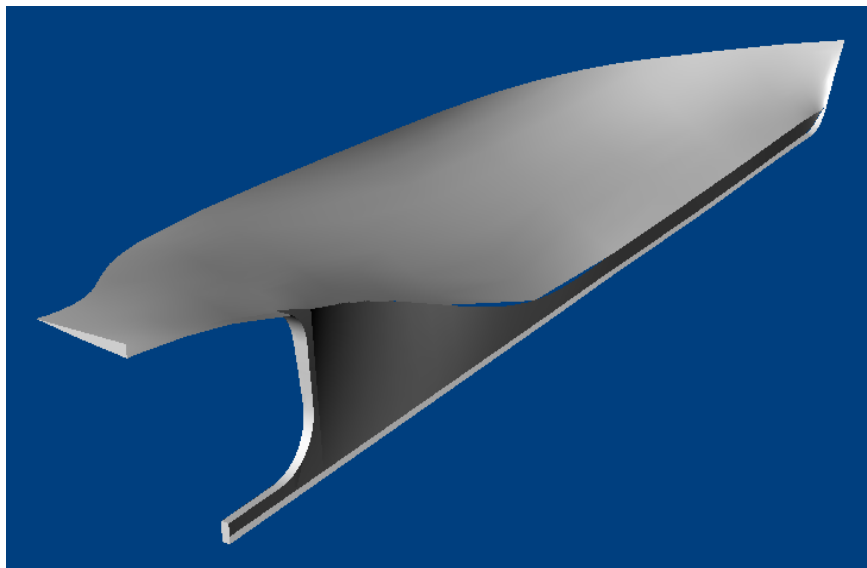


Ilustración 33: Superficie del casco a estudiar hidrodinámicamente

4.1.4 Diseño de los bulbos

Las soluciones propuestas para la posible mejora del rendimiento de la carena original fueron las de acoplarle dos bulbos y ensayarlos para ver si los resultados obtenidos son lo suficientemente convincentes para llevar a cabo una posible reforma del casco.

Bulbo 1: El bulbo número uno se diseñó de una forma picuda para comprobar que al contrario de lo que se suele pensar, que es que un bulbo de este tipo penetra más en el agua y daría mejores resultados ocurre todo lo contrario.

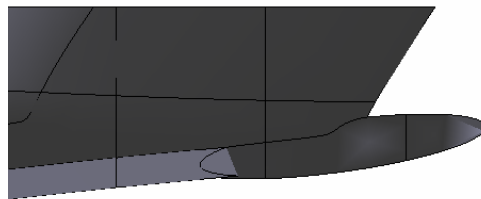


Ilustración 34: Bulbo 1

Bulbo 2: En el diseño de este bulbo tampoco se ha seguido como patrón ningún bulbo ya existente, simplemente se ha diseñado para que su forma de proa sea mucho más redondeada que la del anterior y ver que diferentes efectos lleva esto consigo.

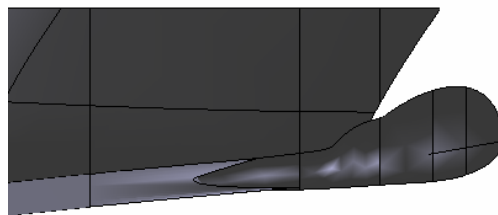


Ilustración 35: Bulbo 2

4.1.5 Creación del volumen de control

Una vez el barco se halla importado a Tdyn como archivo *****.iges**, hay que crear un volumen de control lo suficientemente grande para los límites de éste no distorsionen los resultados, pero que a su vez no sea excesivamente grande.

Para la generación de un volumen hay que tener previamente dibujadas las superficies que lo van a definir, para la creación de una superficie debes contar con las líneas que las forman y para la generación de una línea debes tener los puntos que la van a definir.

A la hora de exportar el barco, como sólo se va a trabajar con la mitad del mismo por ser simétrico, todos los puntos y líneas que forman el plano de simetría deben tener su coordenada **Y** correspondiente en el punto cero. Puede ocurrir que esto no se cumpla ya que al exportarlo, algunas zonas del barco pueden sufrir pequeñas modificaciones. En caso de tener que mover algún punto de la geometría, esto se haría utilizando una de las herramientas de dibujo del programa, a la cual se accede a través de: **Geometry→Edit→Move point.**

Para la definición del volumen de control el primer paso es situar los puntos que van a definir las líneas, estas después formaran superficies y las superficies el volumen de control.

Para crear un punto: **Geometry→Create→Point**

Coordenadas de los Puntos:

<i>Proa</i>	<i>Popa</i>
35,0,2	-50,0,2
35,-26,2	-50,-26,2
35,-26,-15	-50,-26,-15
35,0,-15	-50,0,-15

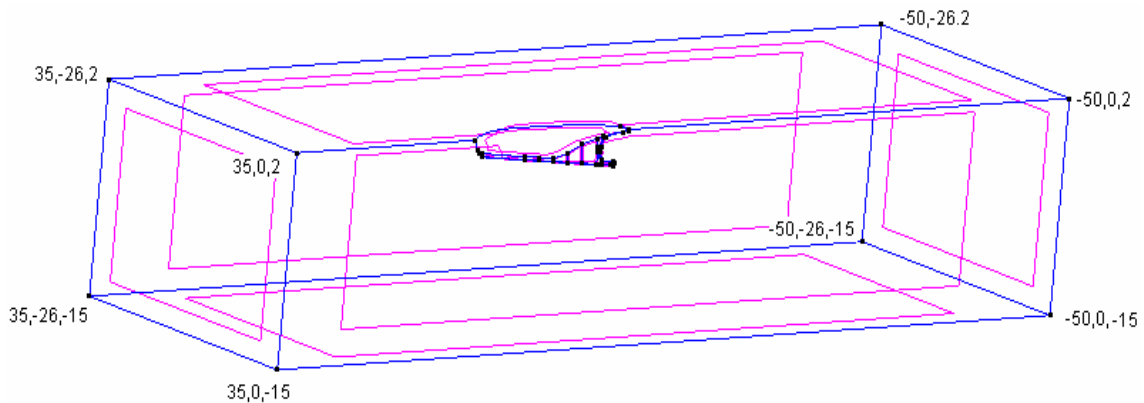


Ilustración 36: Generación del volumen de control



Ilustración 37: Icono generación de línea



Ilustración 38: Icono generación de superficies



Ilustración 39: Icono generación de volúmenes

Una vez se hayan definido las superficies llega el momento de crear el volumen de control.

En barcos con espejo plano (como es este caso), o que la zona de popa se corte de forma muy abrupta, la generación del volumen de control puede presentar problemas, para solucionar este problema hay que crear una estructura denominada cuchara; no se modifica en nada la forma original del barco y su cometido es simular la forma de la ola a popa del barco.

Los requisitos que debe cumplir son que sea tangente a la salida de la bovedilla del codaste y a la superficie libre en el otro extremo.

En cuanto a su longitud, se recomiendan valores en torno a $\pi \cdot Fn^2 \cdot L$ para "Fn normales" y $0.35 \cdot L$ para valores elevados o pequeños de Fn.

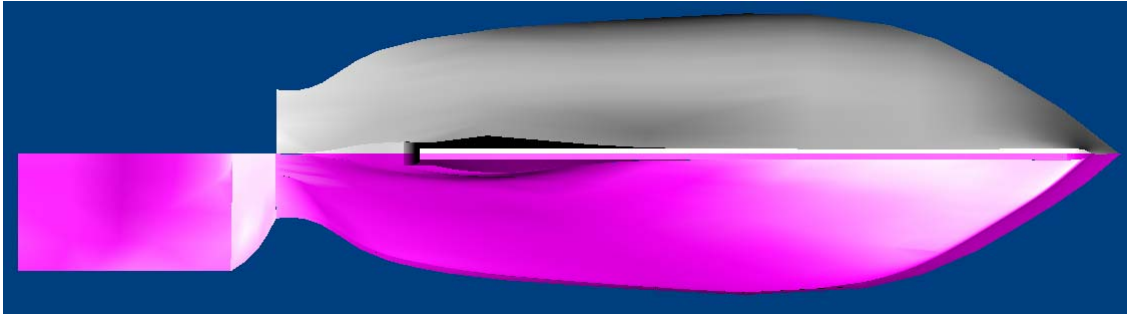


Ilustración 40: Comparación de los cascos, en gris el original

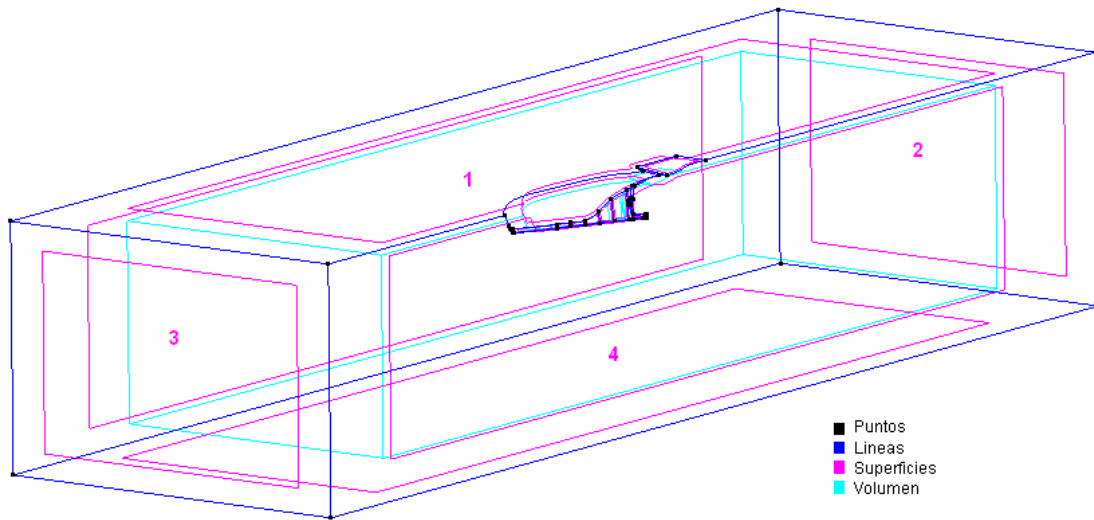


Ilustración 41: volumen de control

4.1.6 Condiciones de contorno

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

4.1.6.1 RANSOL

Las condiciones de contorno se aplican sobre puntos, líneas, superficies y volúmenes, aplicando con el marcado de las casillas correspondientes los valores en que deben ser aplicados.

Pressure_Field: esta condición de contorno está aplicada sobre las superficies 2 y 3, dejando activo en ambas la casilla correspondiente a Fix Initial

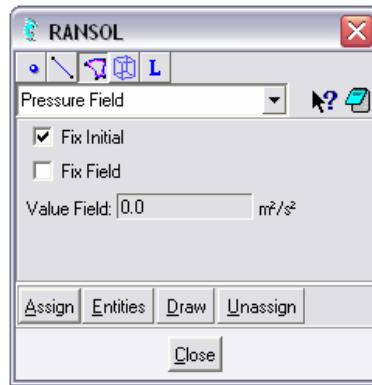


Ilustración 42: Pressure Field

Velocity_Field: esta condición de contorno se aplica a las superficies 1,3 y 4.

En la superficie 1 dejaremos activa la casilla correspondiente Fix Initial Y

En la superficie 3 dejaremos activa la casilla correspondiente Fix Initial X, Fix Initial Y, Fix Initial Z

En la superficie 4 dejaremos activa la casilla correspondiente Fix Initial Z

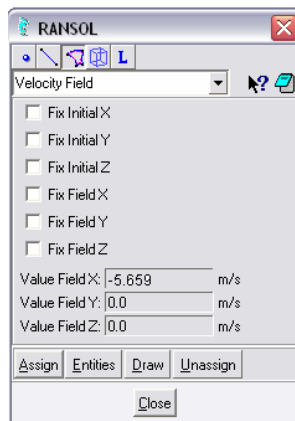


Ilustración 43: Velocity Field

4.1.6.2 NAVAL

Fix Beta: La condición de contorno del modulo naval se aplica a una línea de la cuchara, la línea 85.

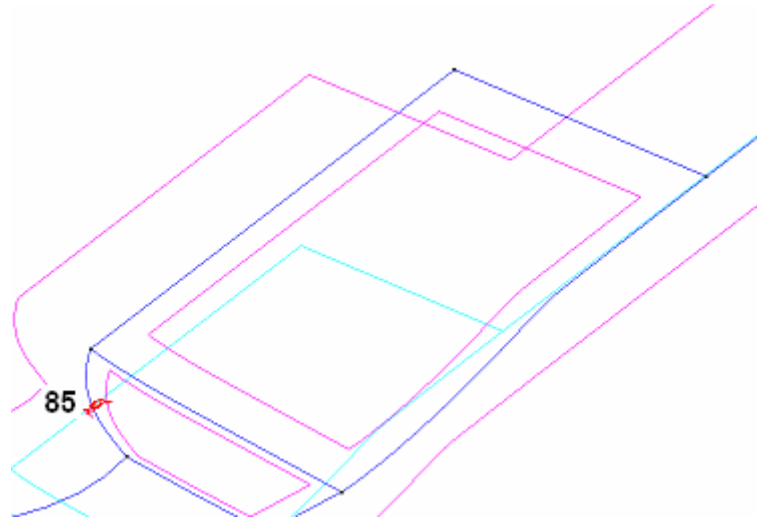


Ilustración 44: Condición de contorno del módulo Naval

Las condiciones de contorno anteriormente aplicadas se pueden visualizar desde cualquier ventana de aplicación de condiciones de contorno, accediendo como indica la figura.

En la ventana Ransol: Draw→All Ransol

En la ventana Naval: Draw→All Naval

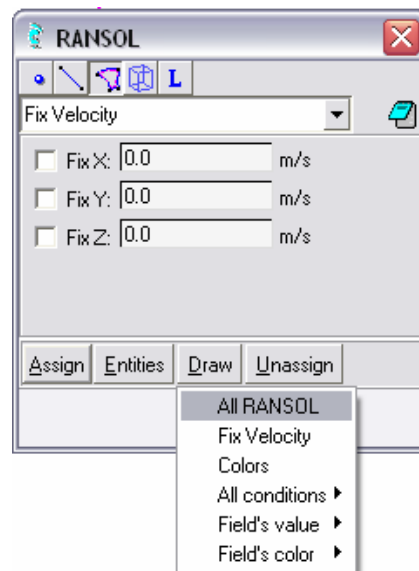


Ilustración 45: Señalización de las condiciones de contorno

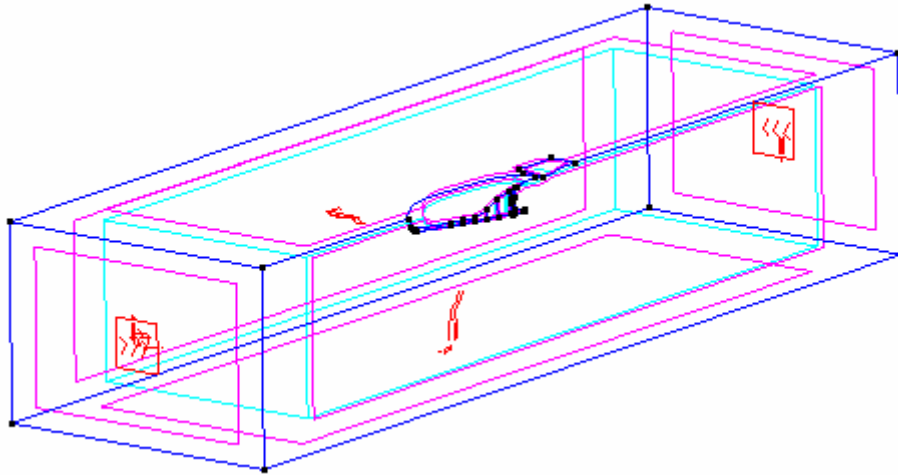


Ilustración 46: Condiciones de contorno del módulo Ransol

4.1.7 Materiales (materials)

Se aplica esta condición de contorno a todo el volumen de control, seleccionar agua de mar.

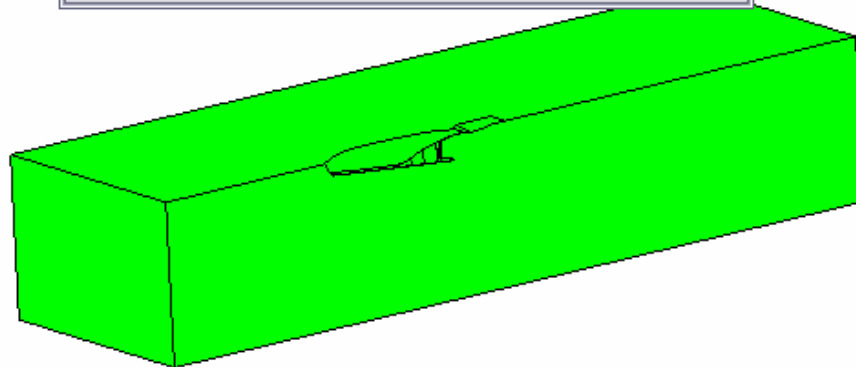
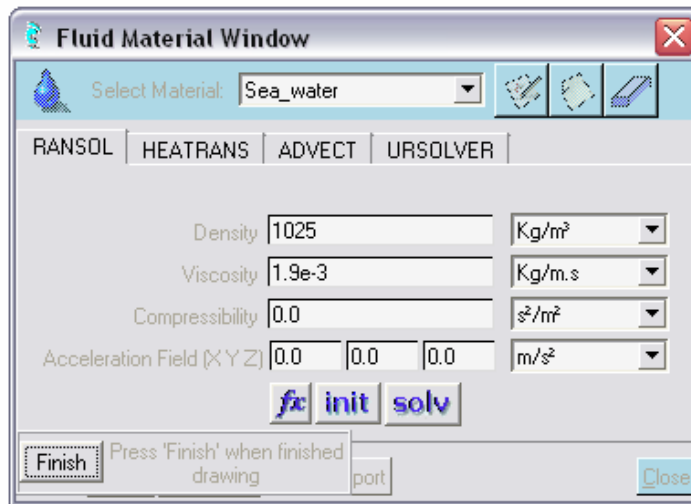


Ilustración 47: Selección del material

4.1.8 Límites (boundaries)

Se seleccionan los límites Fluid_Body y FreeSurface y se aplican a las superficies correspondientes.

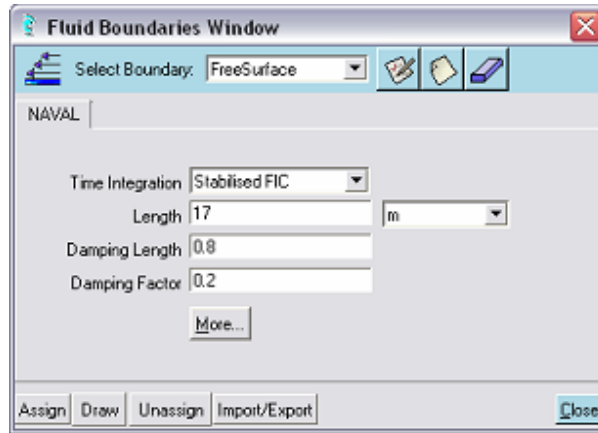


Ilustración 48: Asignación de materiales

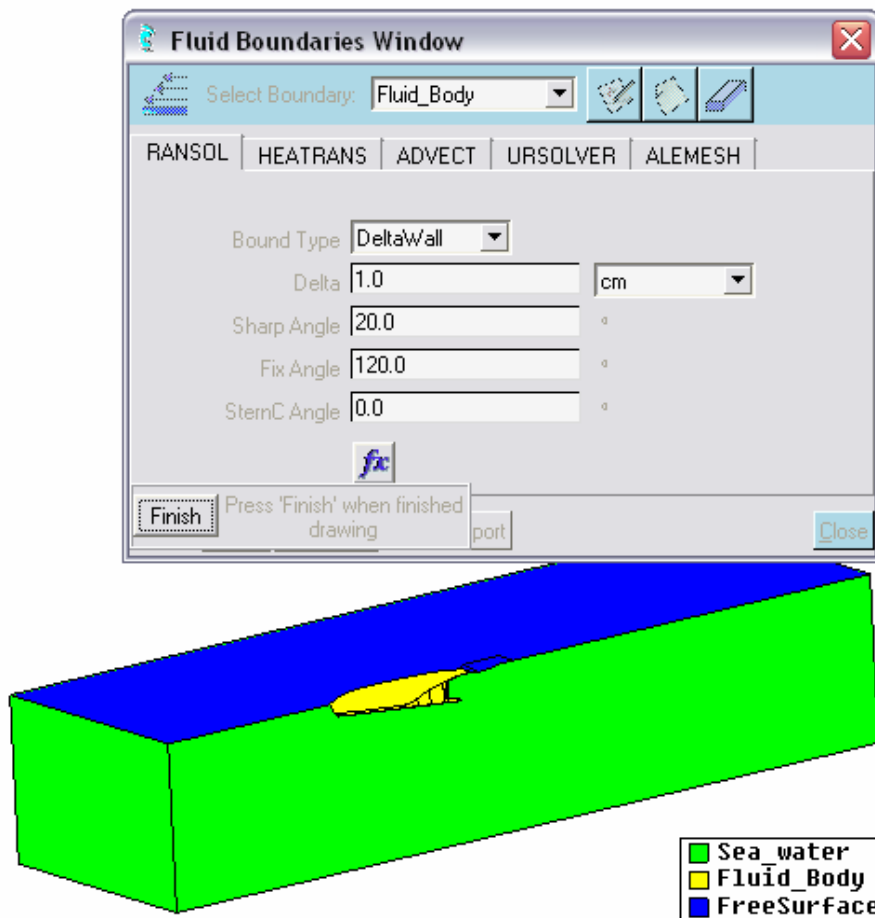


Ilustración 49: Asignación de Materiales

4.1.9 Datos iniciales (initial data)

Se fija la velocidad en su componente correspondiente.

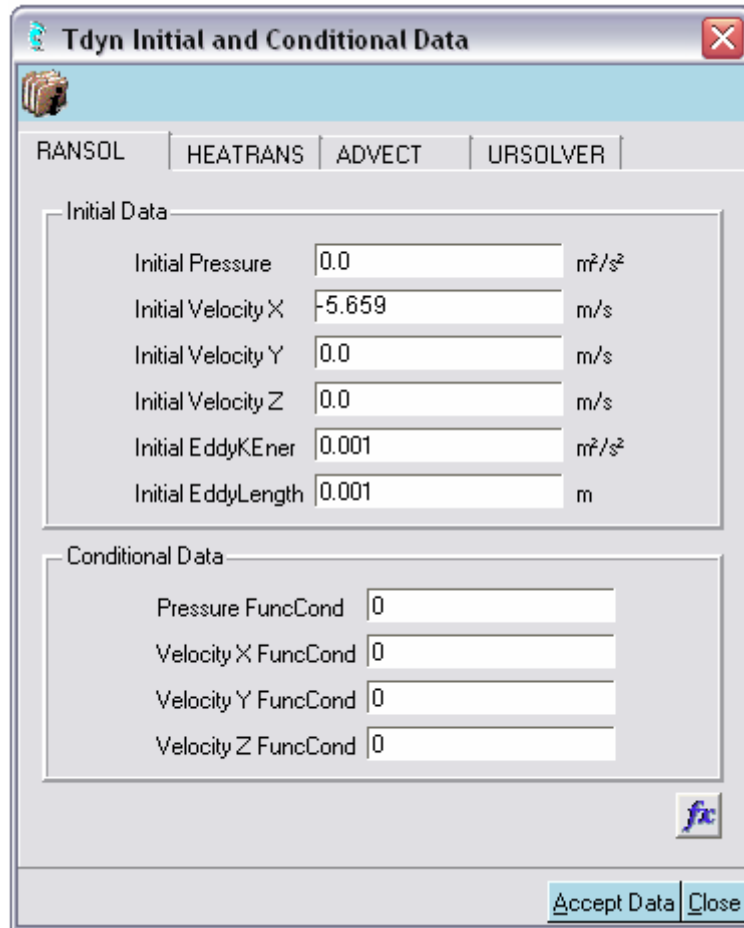


Ilustración 50: Initial Data

4.1.10 Datos del problema (problem data)

Una vez que estén definidas las condiciones de límite se especifican los datos del problema.

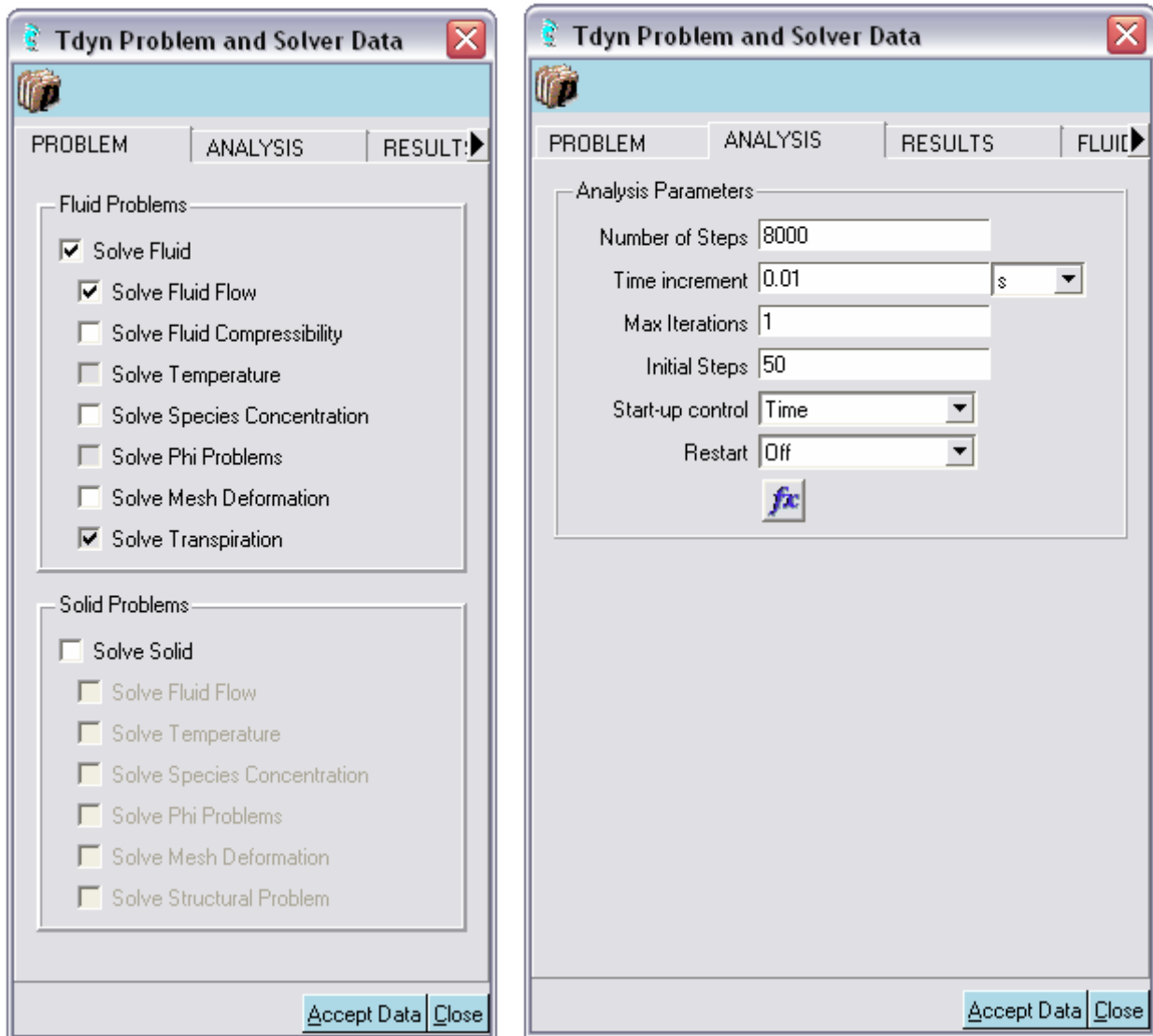


Ilustración 51: Problem & Analysis

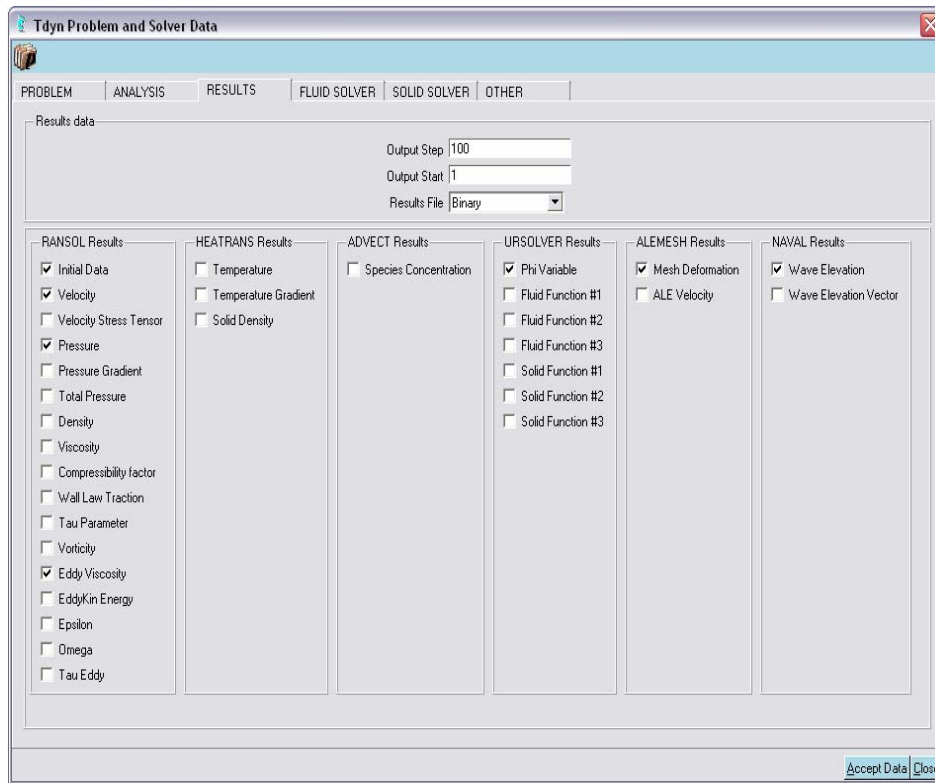


Ilustración 52: Results

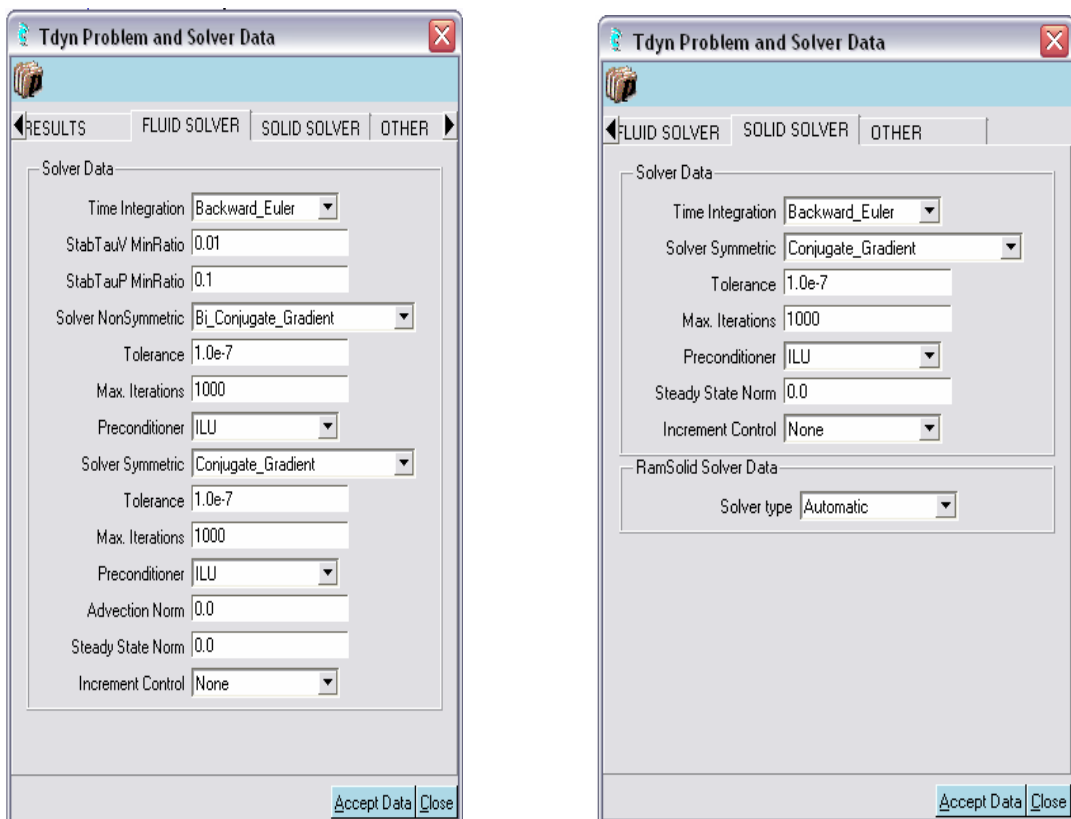


Ilustración 53: Fluid Solver & Solid Solver

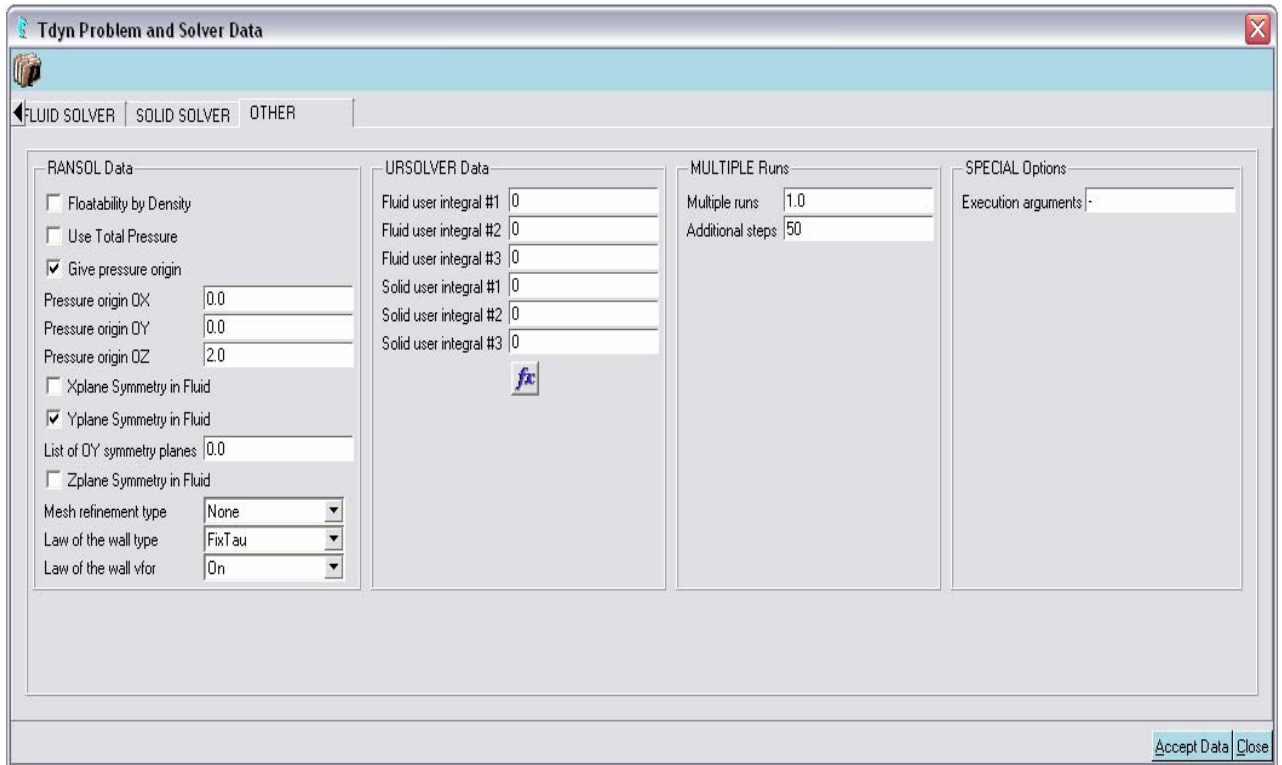


Ilustración 54: Other

4.1.11 Datos del módulo Tdyn (Tdyn modules data)

Es posible seleccionar el modelo de la turbulencia para ser utilizado en el problema.

Para este problema el modelo seleccionado de la turbulencia es energía de K dos capas según lo demostrado en la ventana.

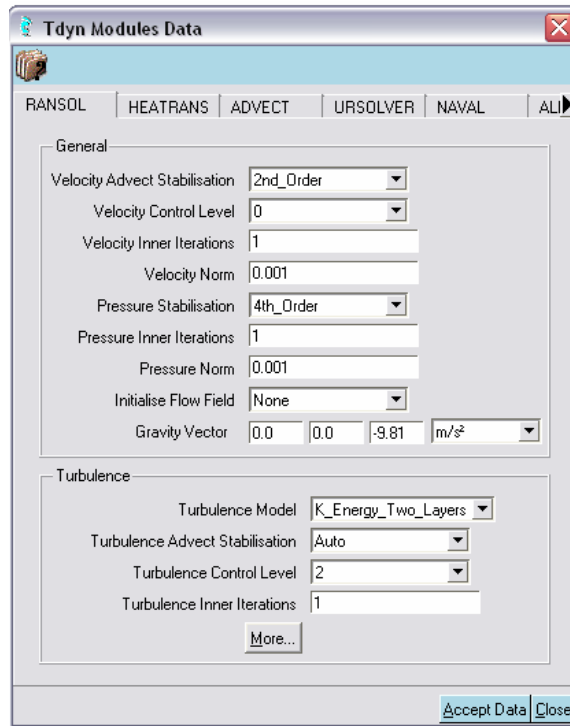


Ilustración 55: Ventana datos del modulo. Definición del modelo de turbulencia

4.1.12 Generación de la malla (generate mesh)

El tamaño de los elementos de malla utilizados para cada uno de los tres modelos a ensayar son los siguientes:

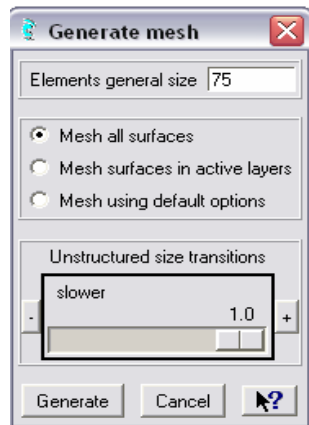


Ilustración 56: Generación de malla

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

Original:

Elementos Lineales: 780
Elementos Triangulares: 74694
Elementos Tetraedro: 175334
Nodos: 49898

Bulbo 1:

Elementos Lineales: 798
Elementos Triangulares: 73854
Elementos Tetraedro: 174428
Nodos: 49518

Bulbo 2:

Elementos Lineales: 784
Elementos Triangulares: 74130
Elementos Tetraedro: 175127
Nodos: 49708

4.1.13 Cálculo (calculate)

Comenzar el proceso de cálculo con el icono correspondiente.

4.1.14 Post-proceso (postprocess)

Se pasa al post-proceso mediante el icono correspondiente.

5. Visualización y comentario de los resultados

Los resultados de los tres ensayos están referidos a una velocidad de 11 nudos (5.659 m/s) y a un paso de tiempo avanzado (step 80) en el cual se considera que todos los resultados son estacionarios y que no van a sufrir más cambios.

Se supone carena limpia:

Eslora de estudio: 17.050 m

Manga de estudio: 2.840 m

Calado de estudio: 2,000 m

Los resultados se presentan a continuación organizados del siguiente modo:

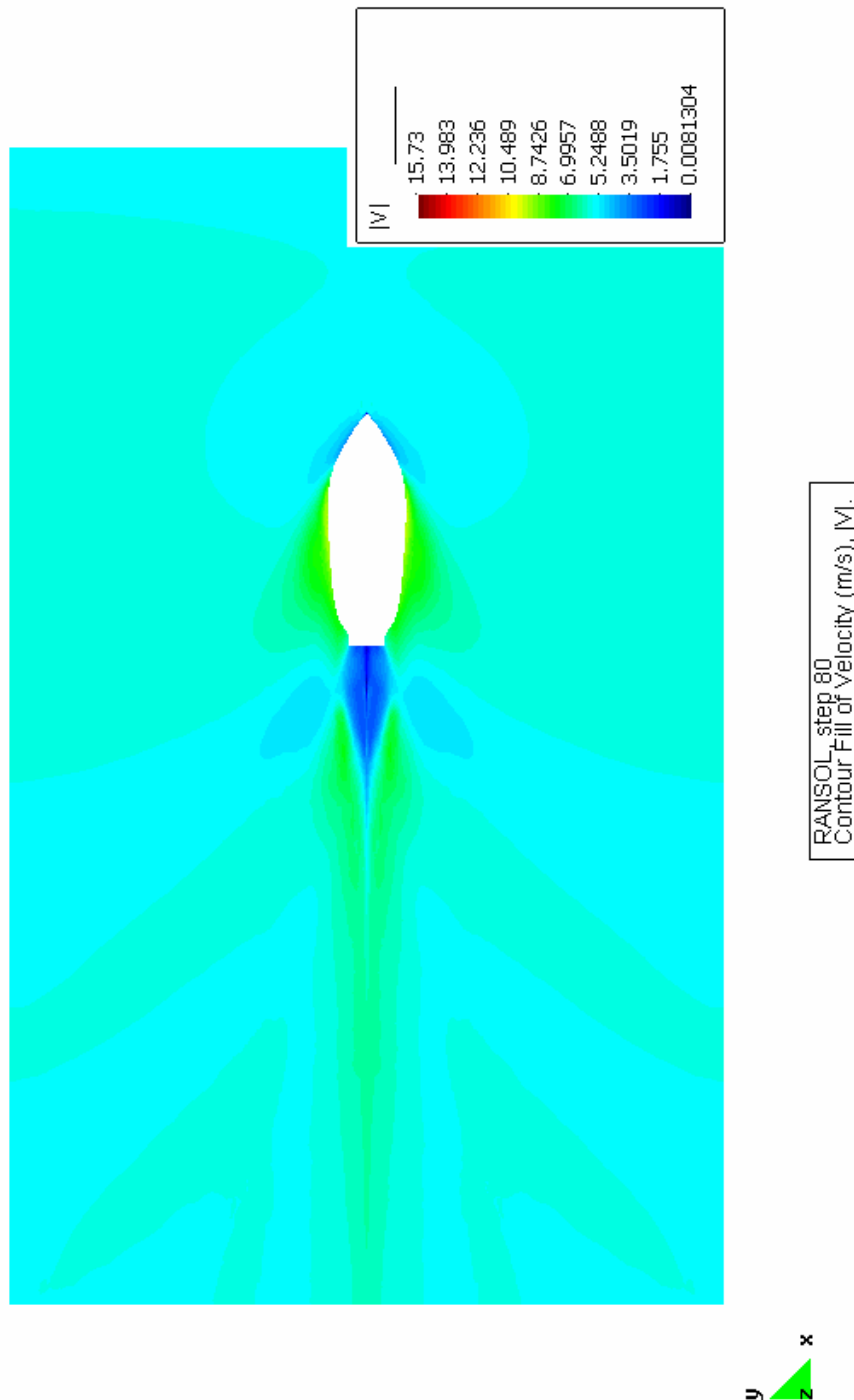
1. Resultados correspondientes a la carena original.
2. Resultados correspondientes a la carena modificada con el primer bulbo.
3. Resultados correspondientes a la carena modificada con el segundo bulbo.
4. Comparación de los resultados entre los tres modelos ensayados.

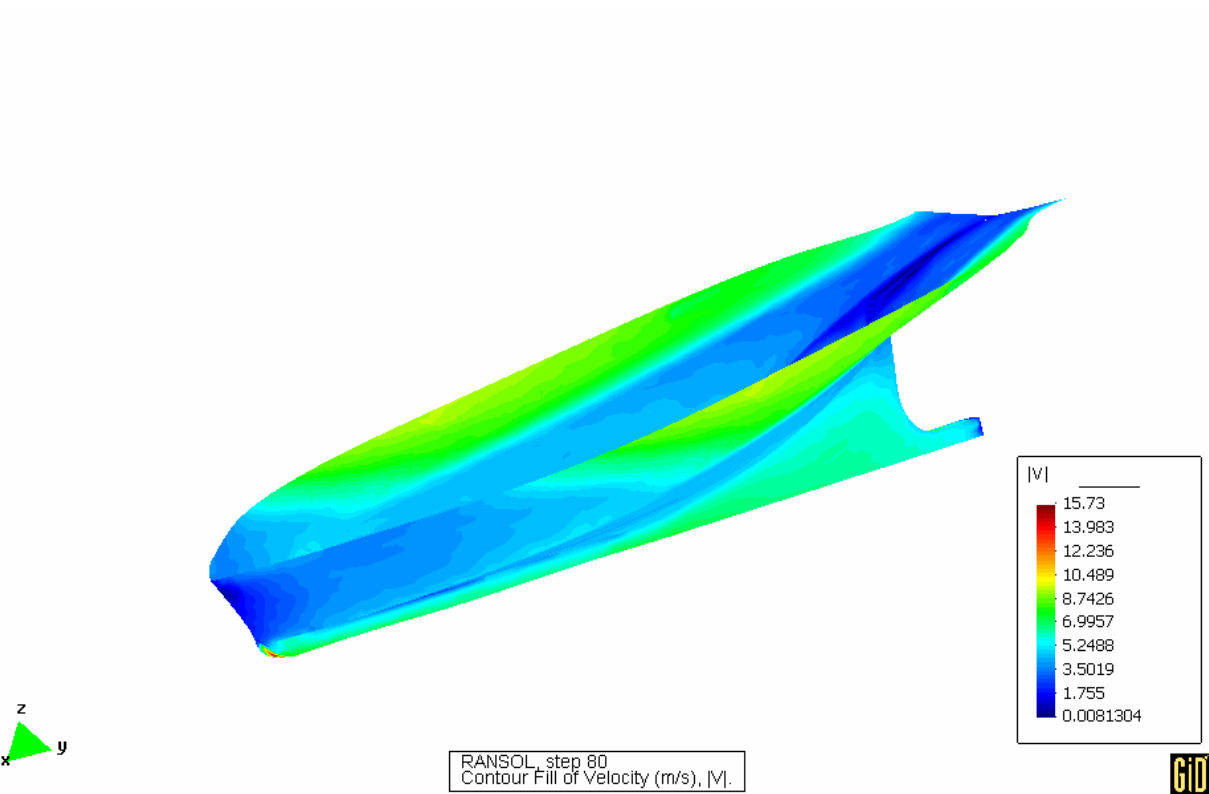
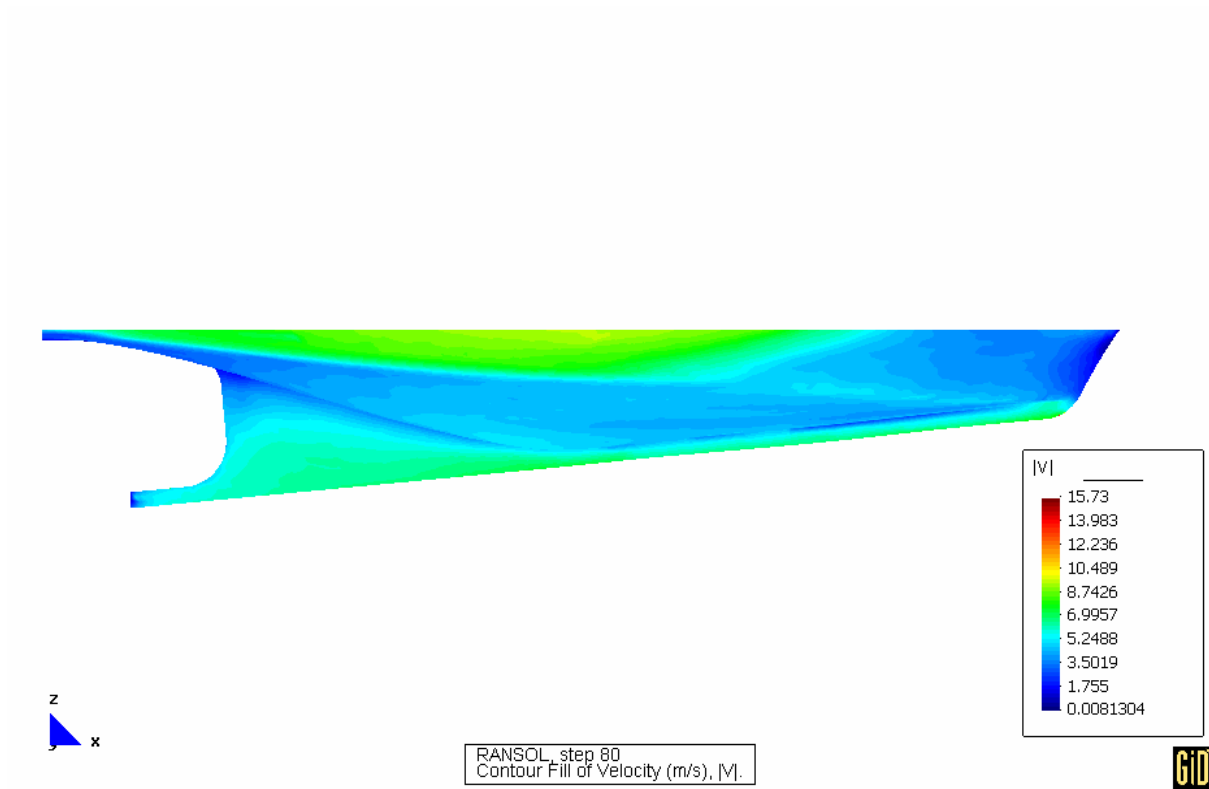
En cada caso se incluyen las vistas de la distribución de velocidades, distribución de presiones, mapas y cortes de la ola, líneas de corriente y un resumen de los resultados en tanto que a fuerzas y momentos se refiere.

5.1 Resultados correspondientes a la carena original

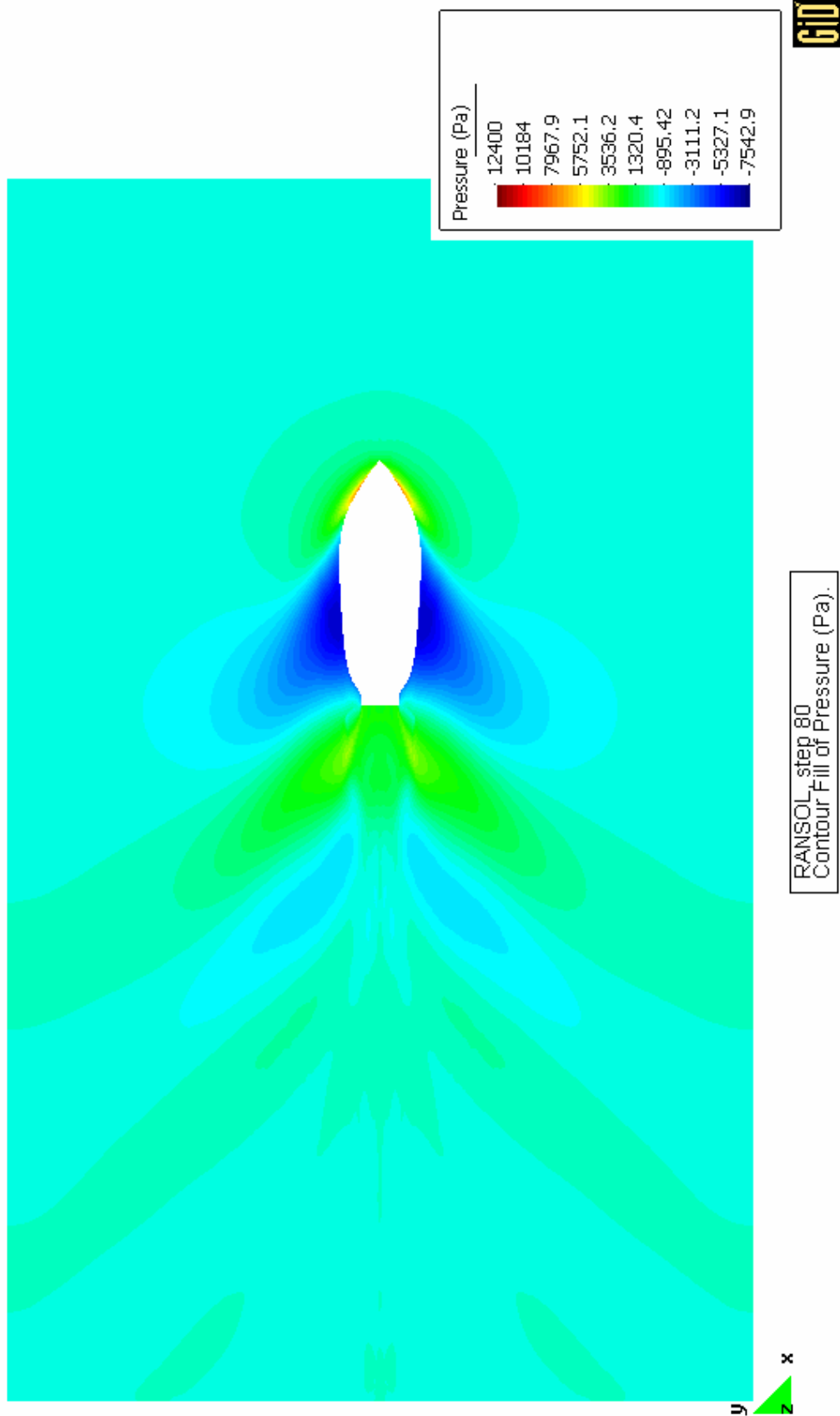
5.1.1 Distribución de velocidades (todas las velocidades están en m/s)

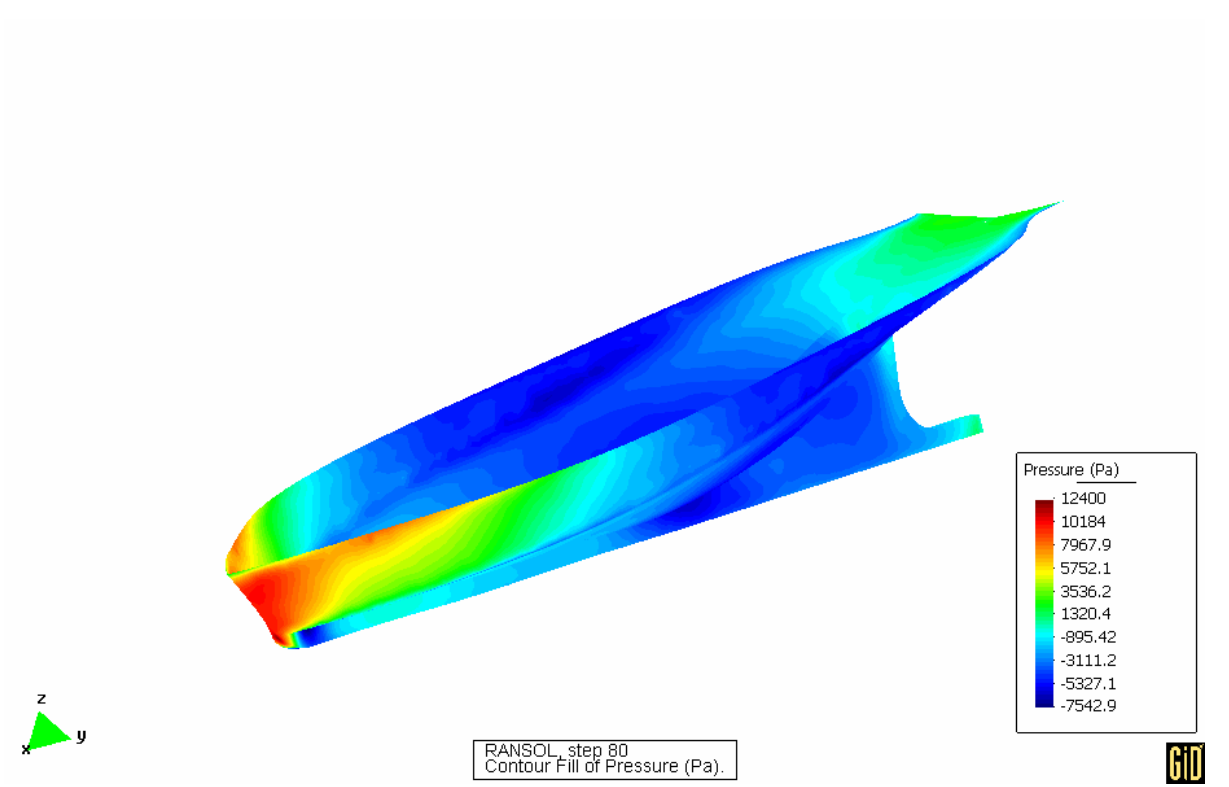
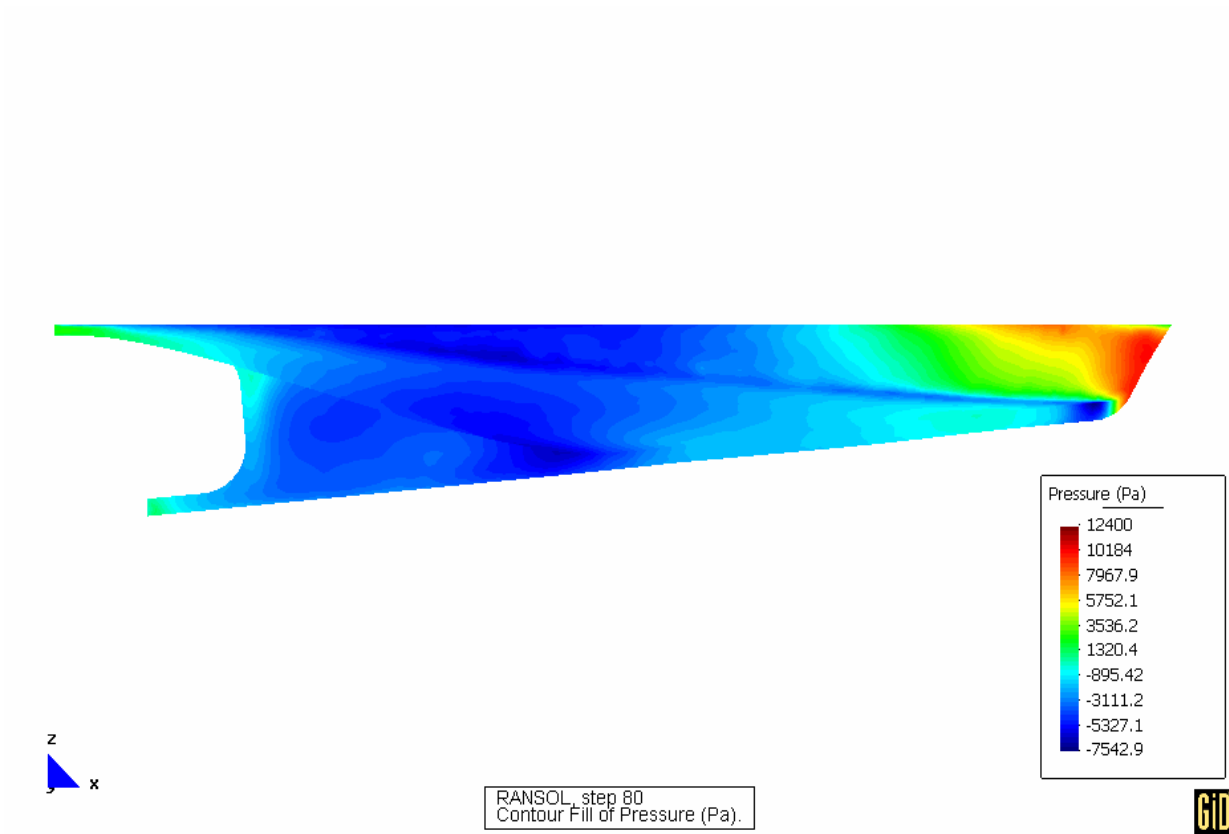
610



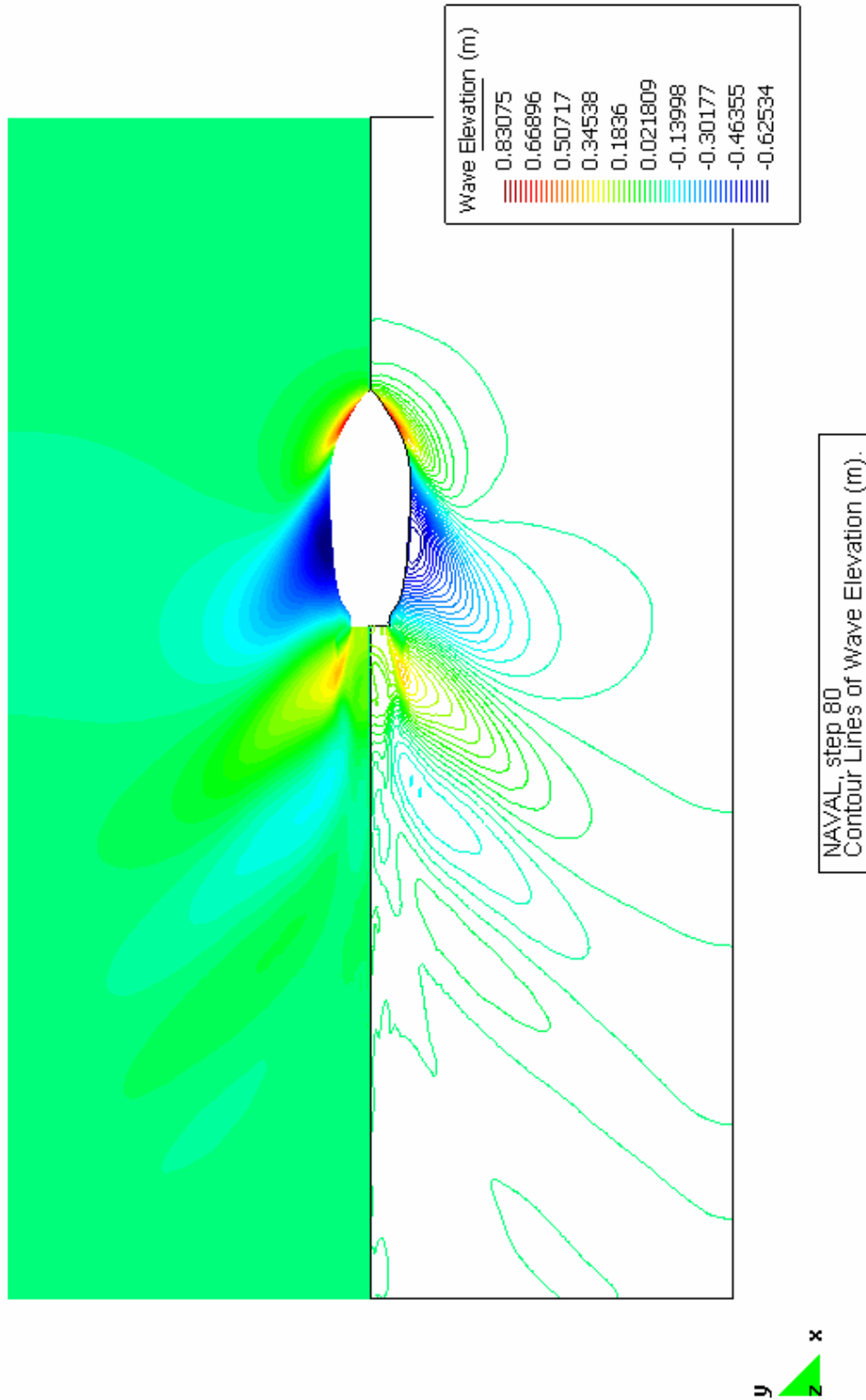


5.1.2 Distribución de presiones





5.1.3 Mapa de olas y cortes

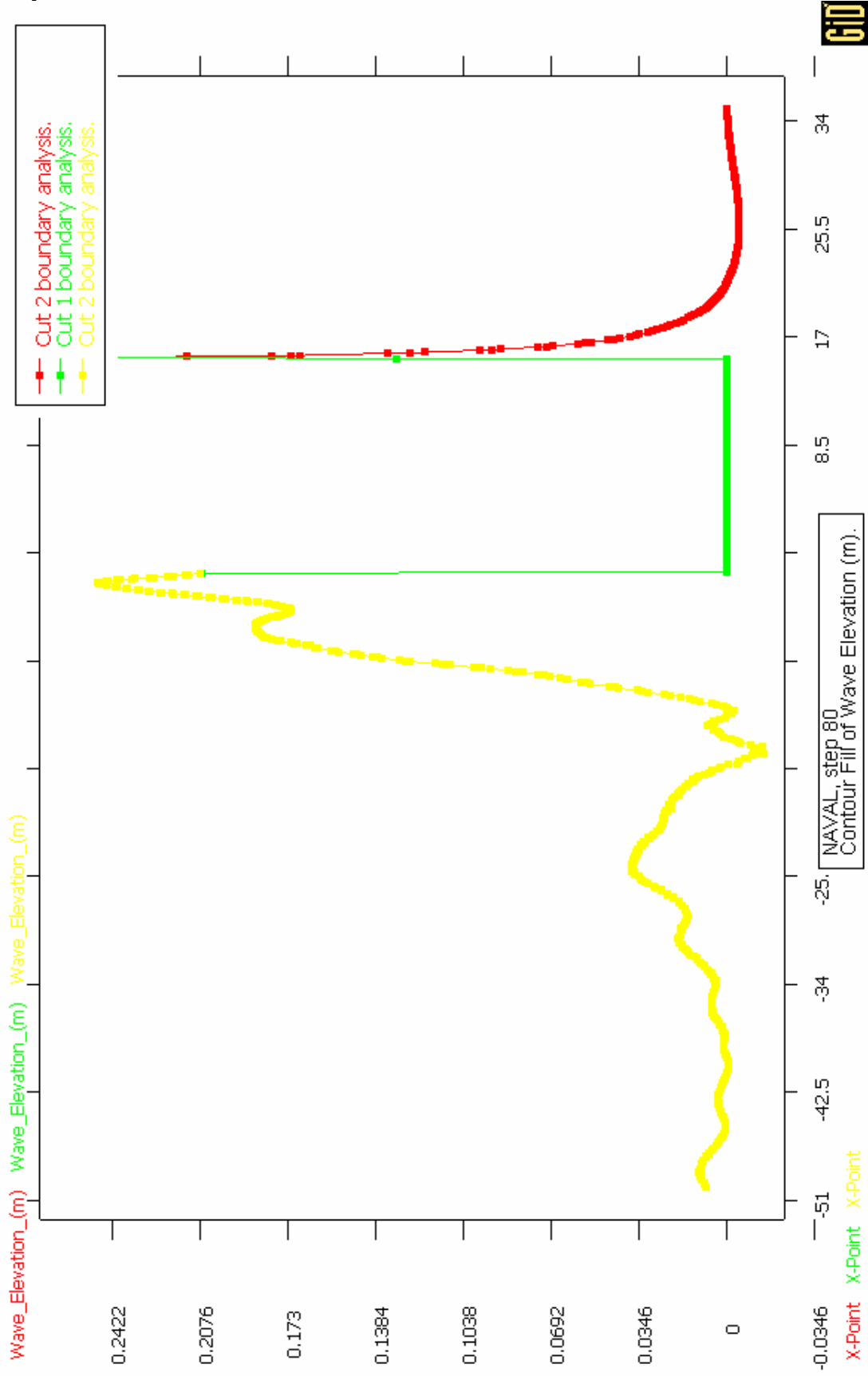


Los cortes de la ola se realizan desde crujía con un intervalo de distancia de $0.25*B$ excepto en los dos últimos cortes, en los que el intervalo es de $0.5*B$, estos cortes son comunes para cada uno de los modelos.

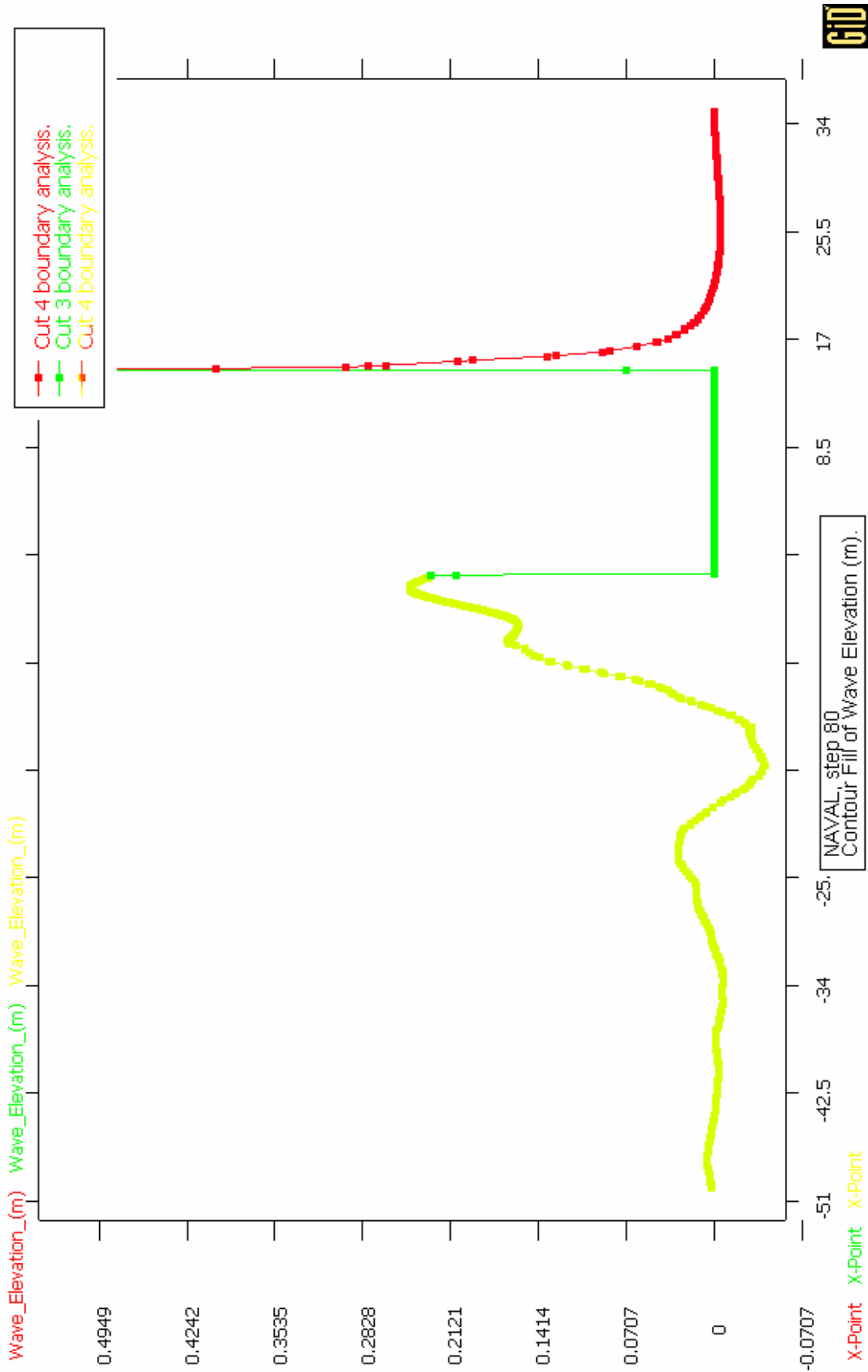
En la representación gráfica de los cortes de la olas, en el eje de las ordenas se tiene el valor de la altura de la ola en metros y en el eje de las abscisas está representada la longitud del volumen de control

Coordenadas	x	y	z	x	y	z
Crujía	35	0,000	2	-50	0,000	2
0.25*B	35	-0,710	2	-50	-0,710	2
0.5*B	35	-1,420	2	-50	-1,420	2
0.75*B	35	-2,130	2	-50	-2,130	2
B	35	-2,840	2	-50	-2,840	2
1.25*B	35	-3,550	2	-50	-3,550	2
1.50*B	35	-4,260	2	-50	-4,260	2
1.75*B	35	-4,970	2	-50	-4,970	2
2*B	35	-5,680	2	-50	-5,680	2
2.5*B	35	-7,100	2	-50	-7,100	2
3*B	35	-8,520	2	-50	-8,520	2

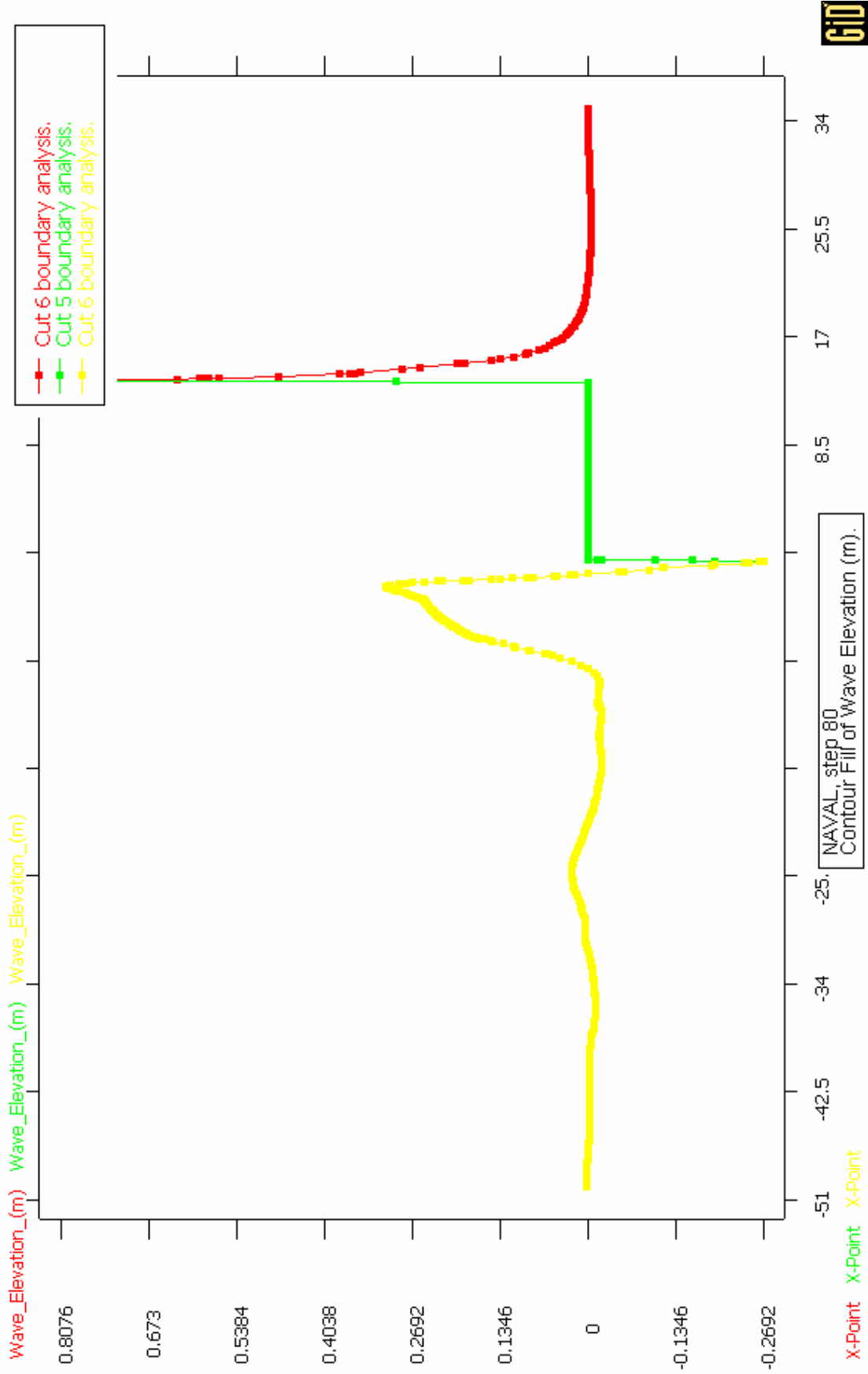
Crujía



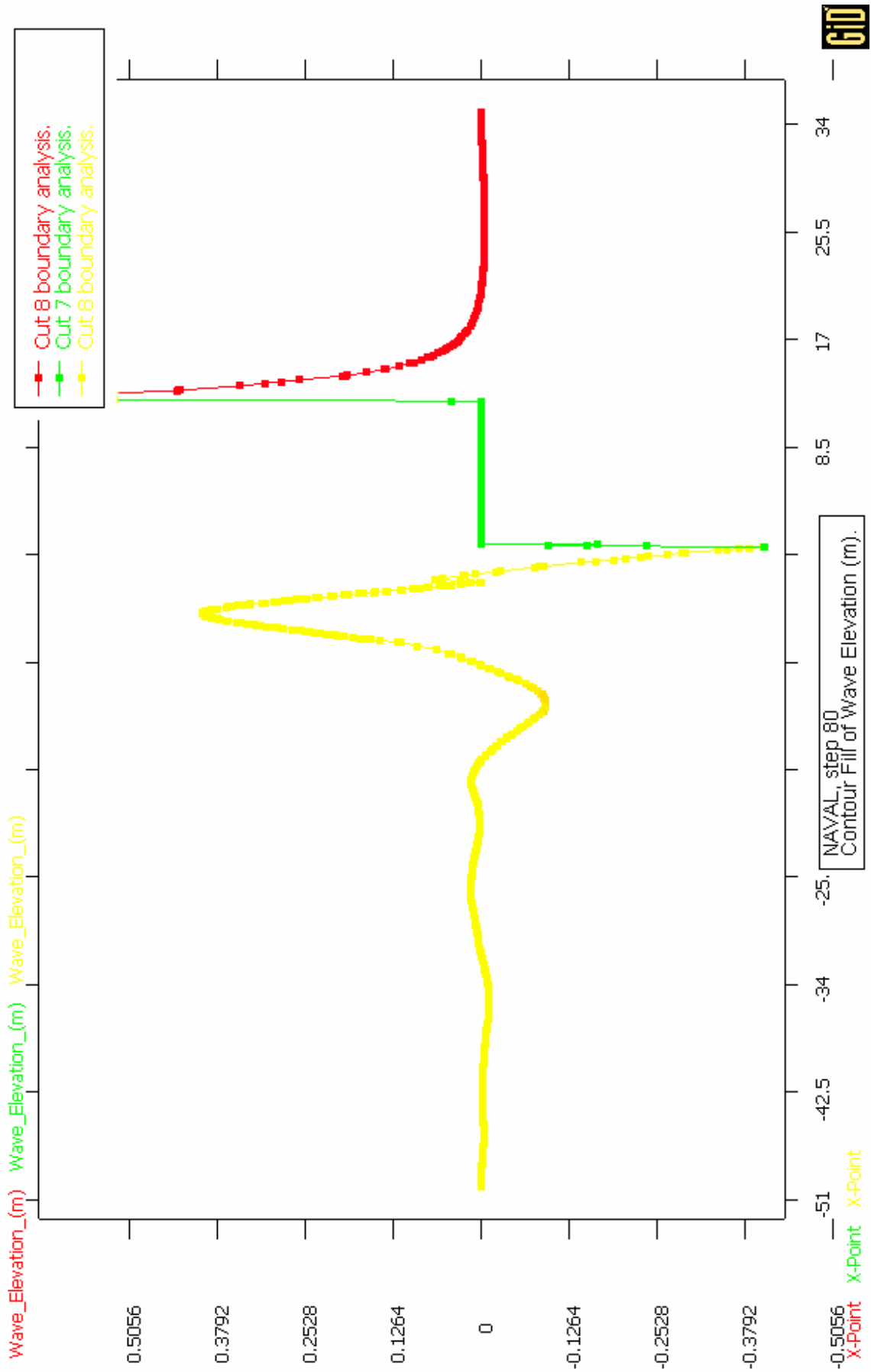
0.25*B



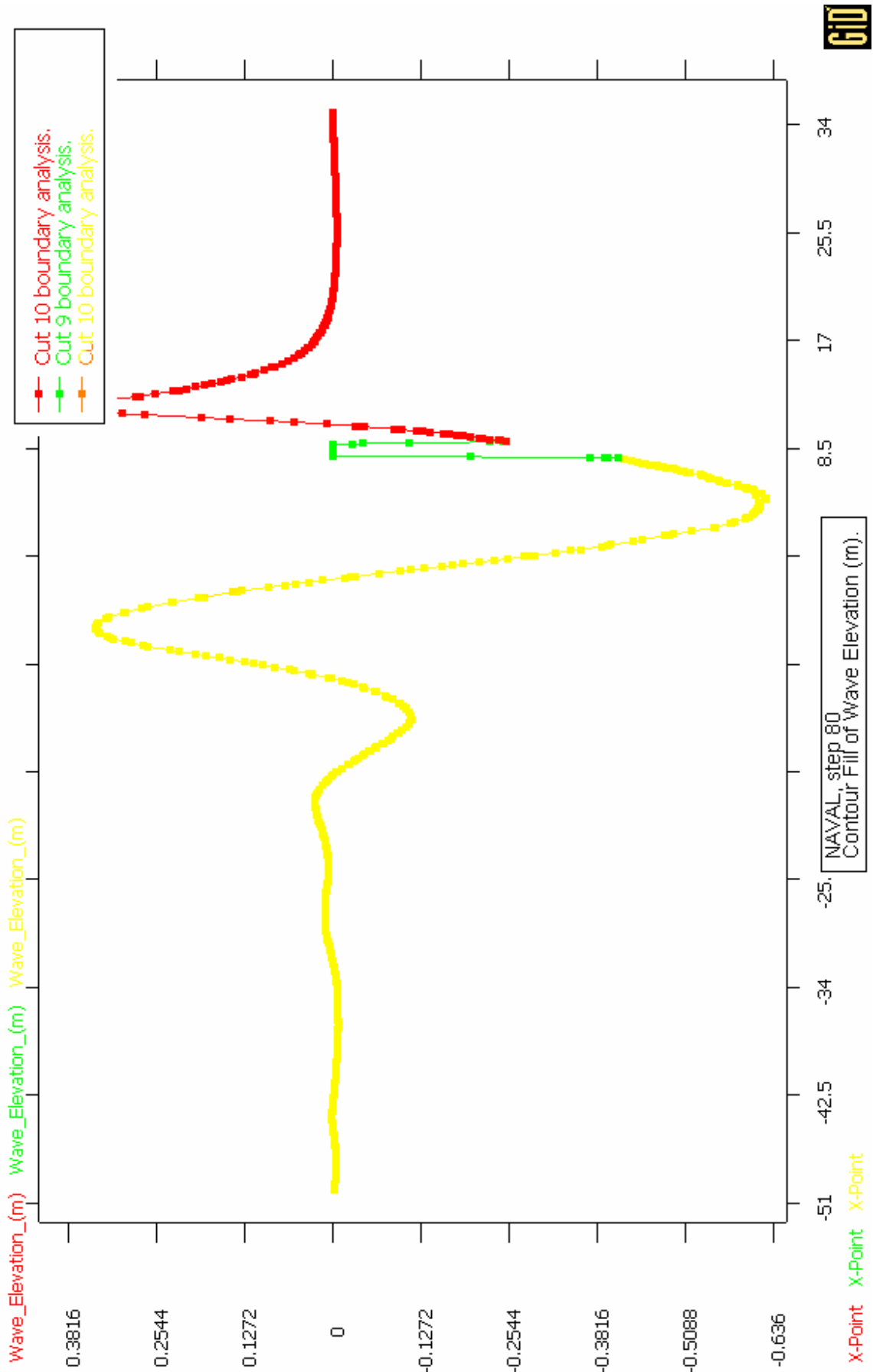
0.5*B



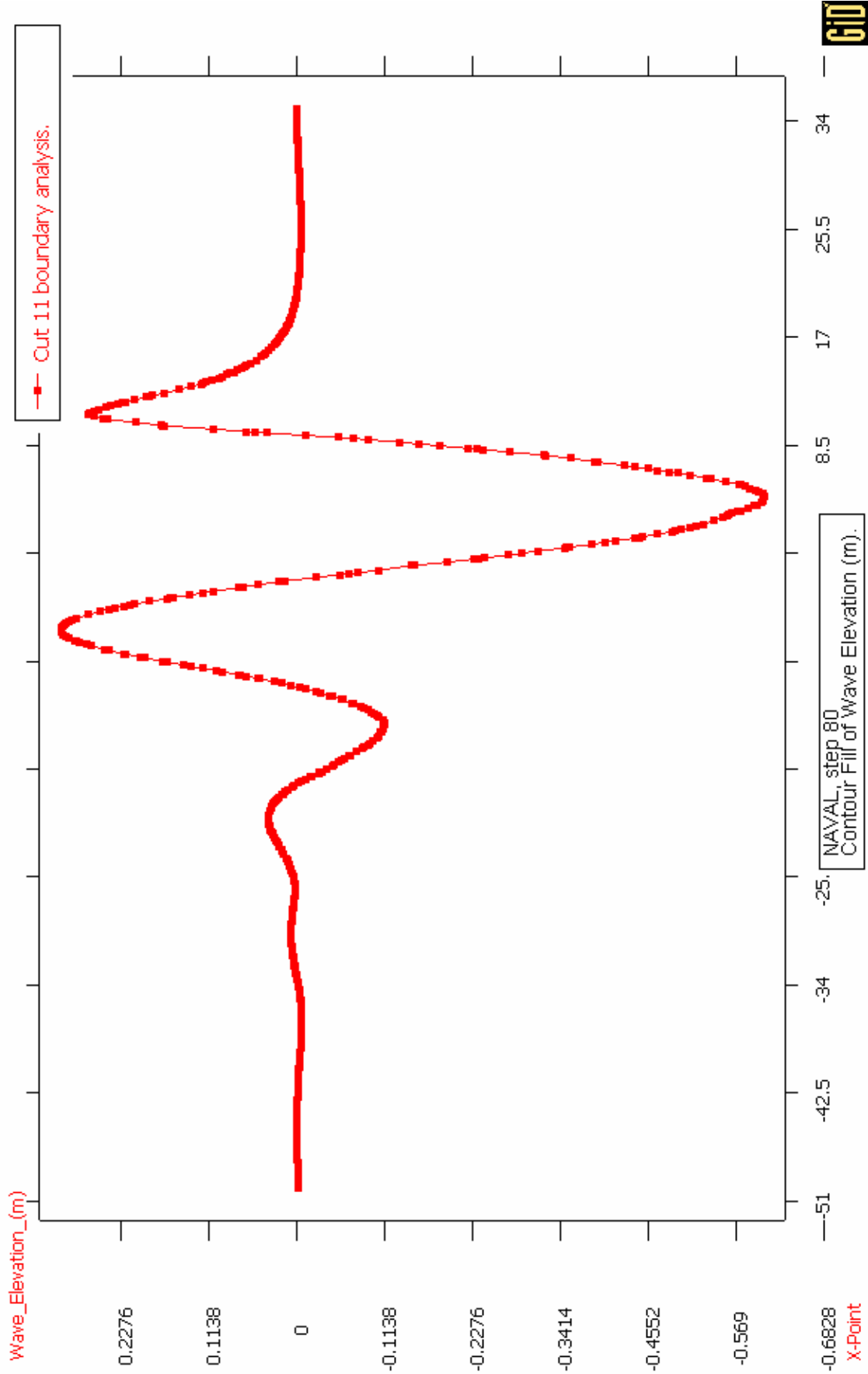
0.75*B



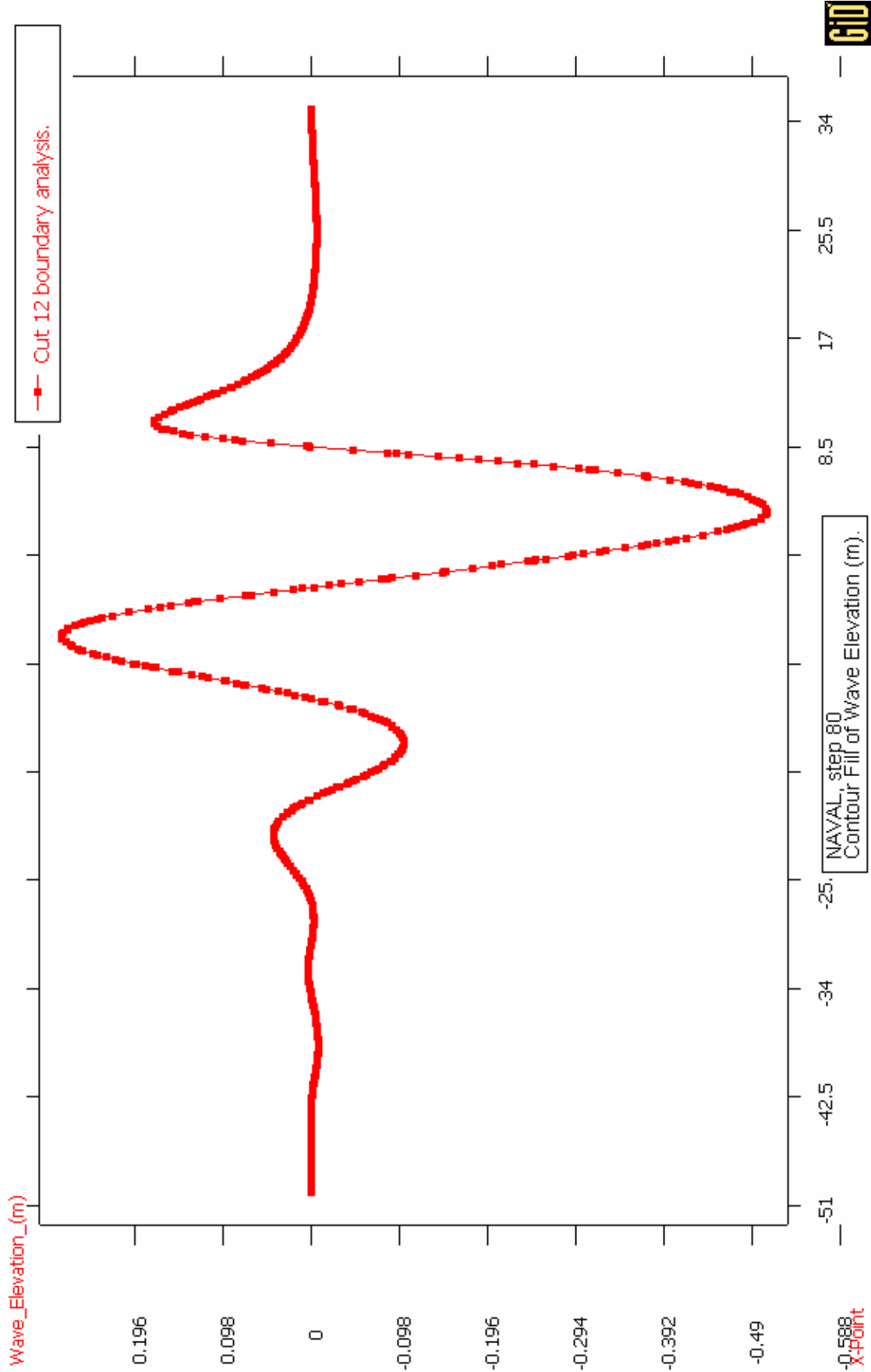
B



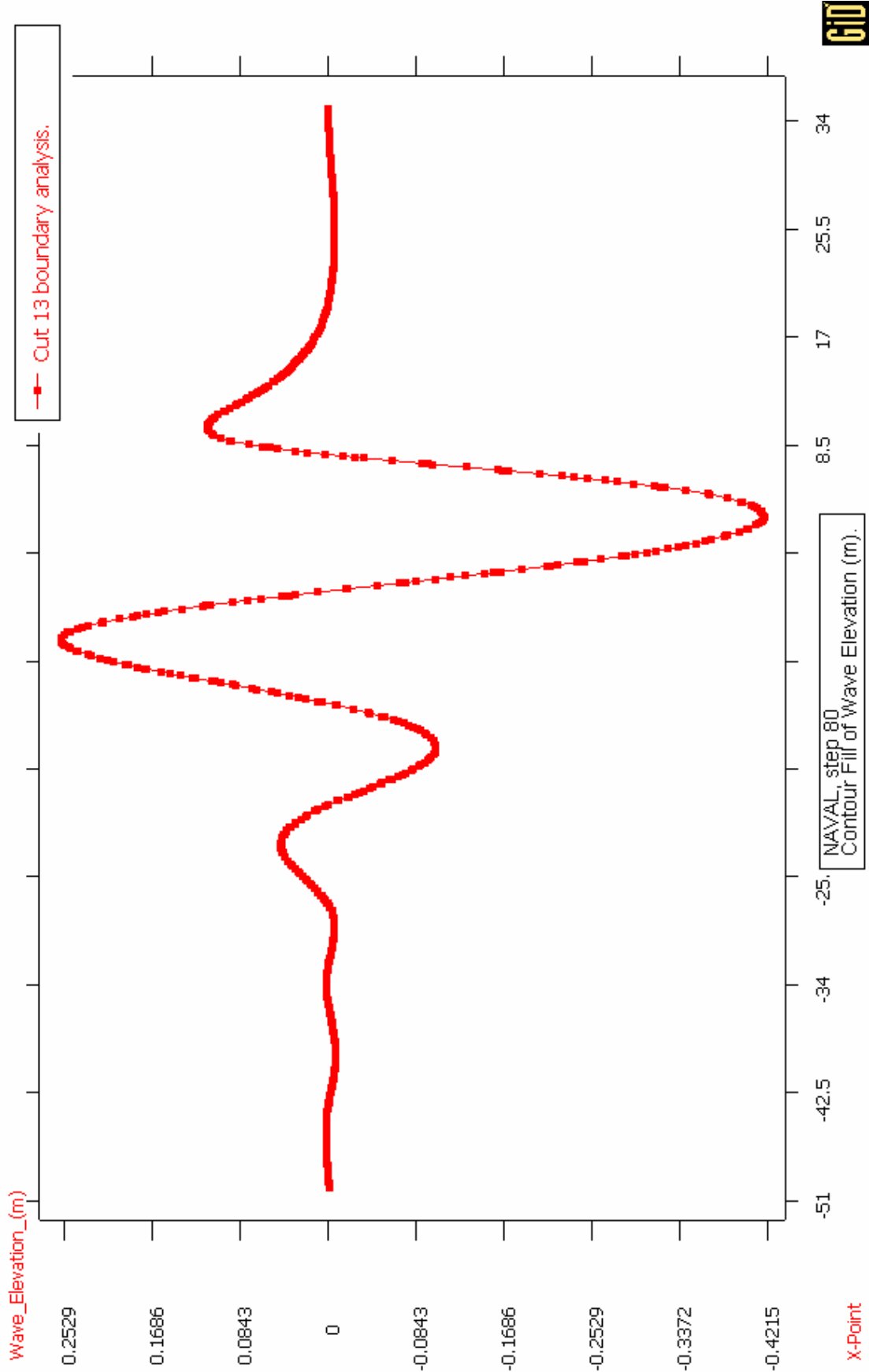
1.25*B



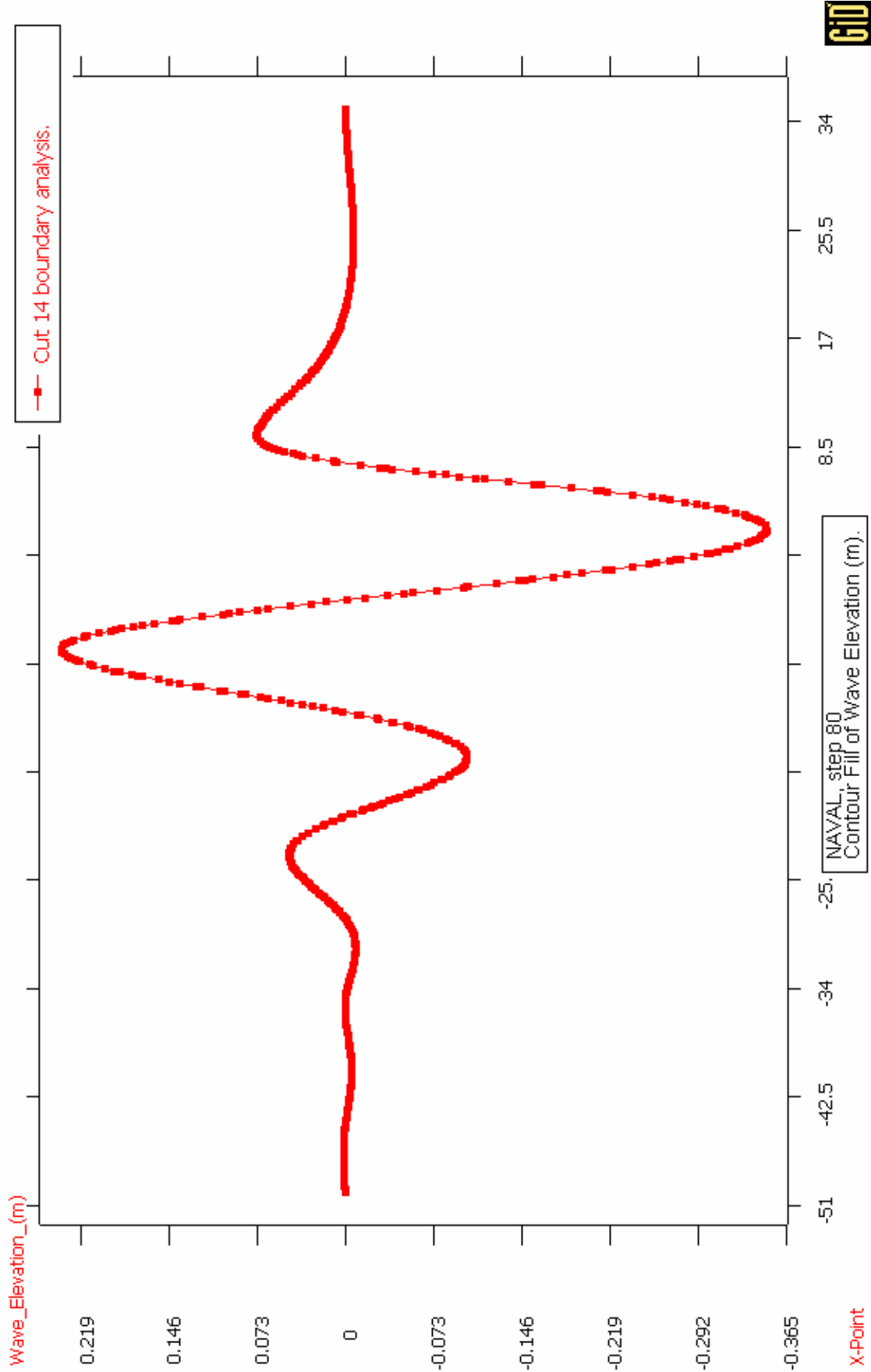
1.50*B



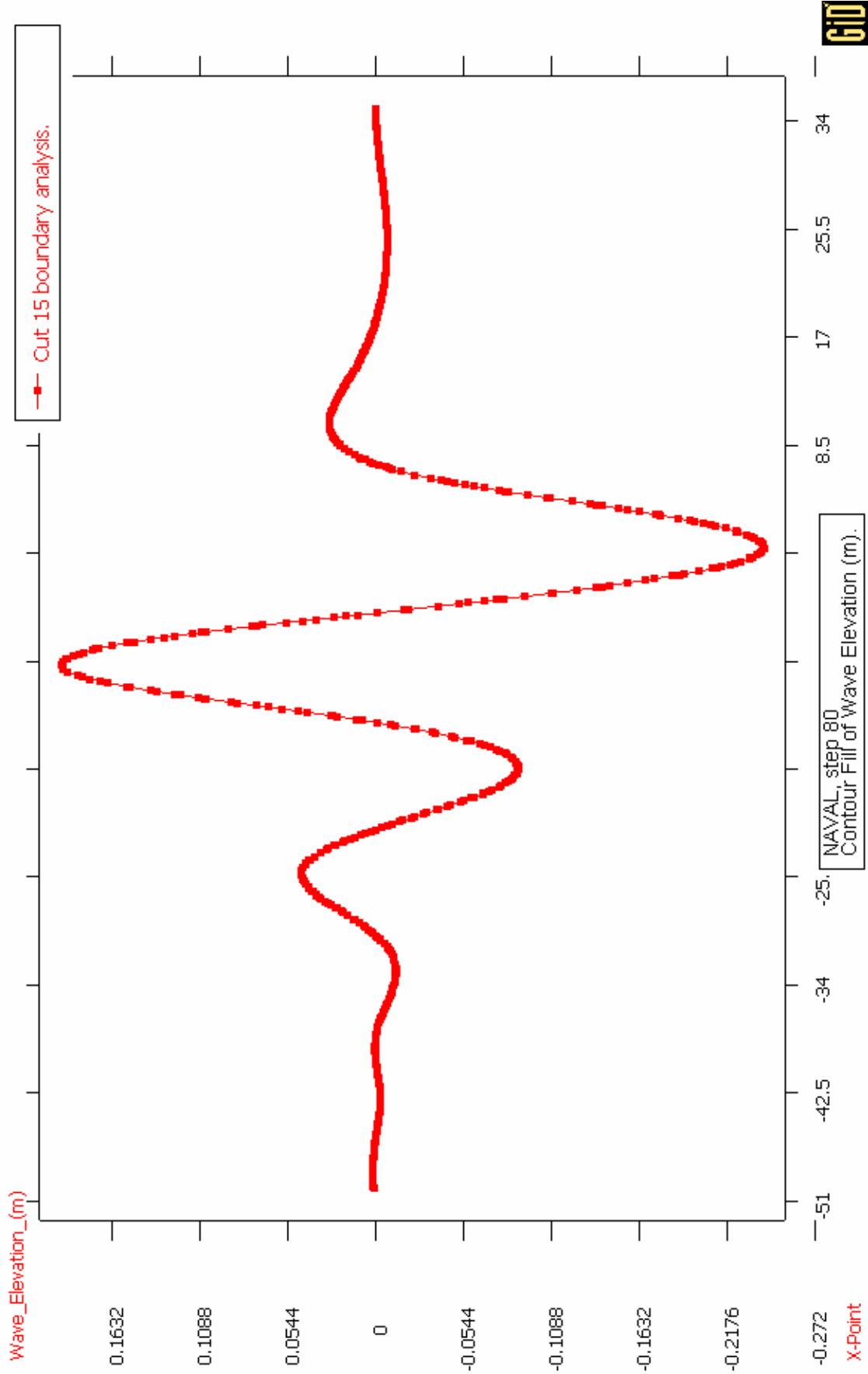
1.75*B



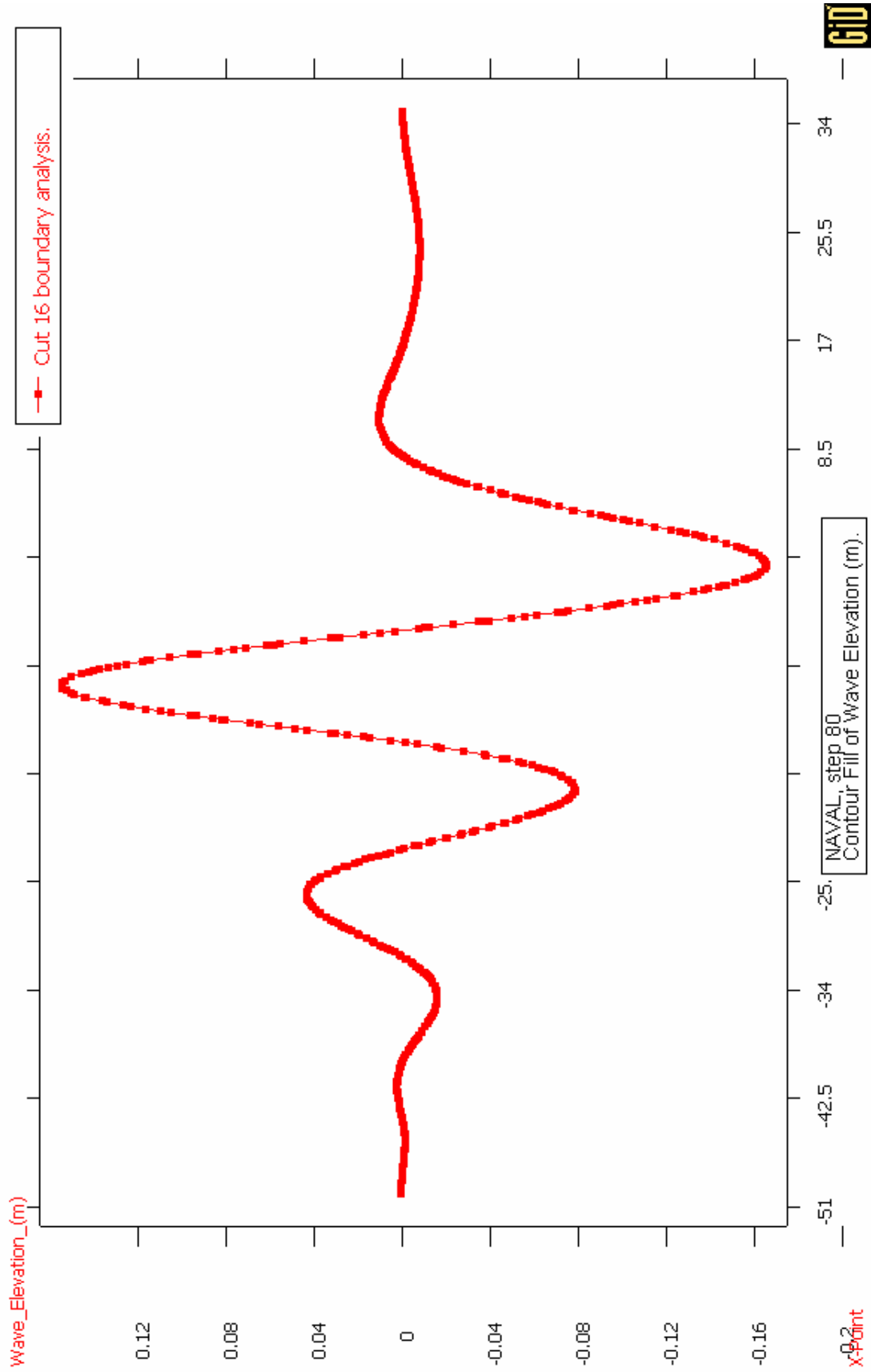
2*B



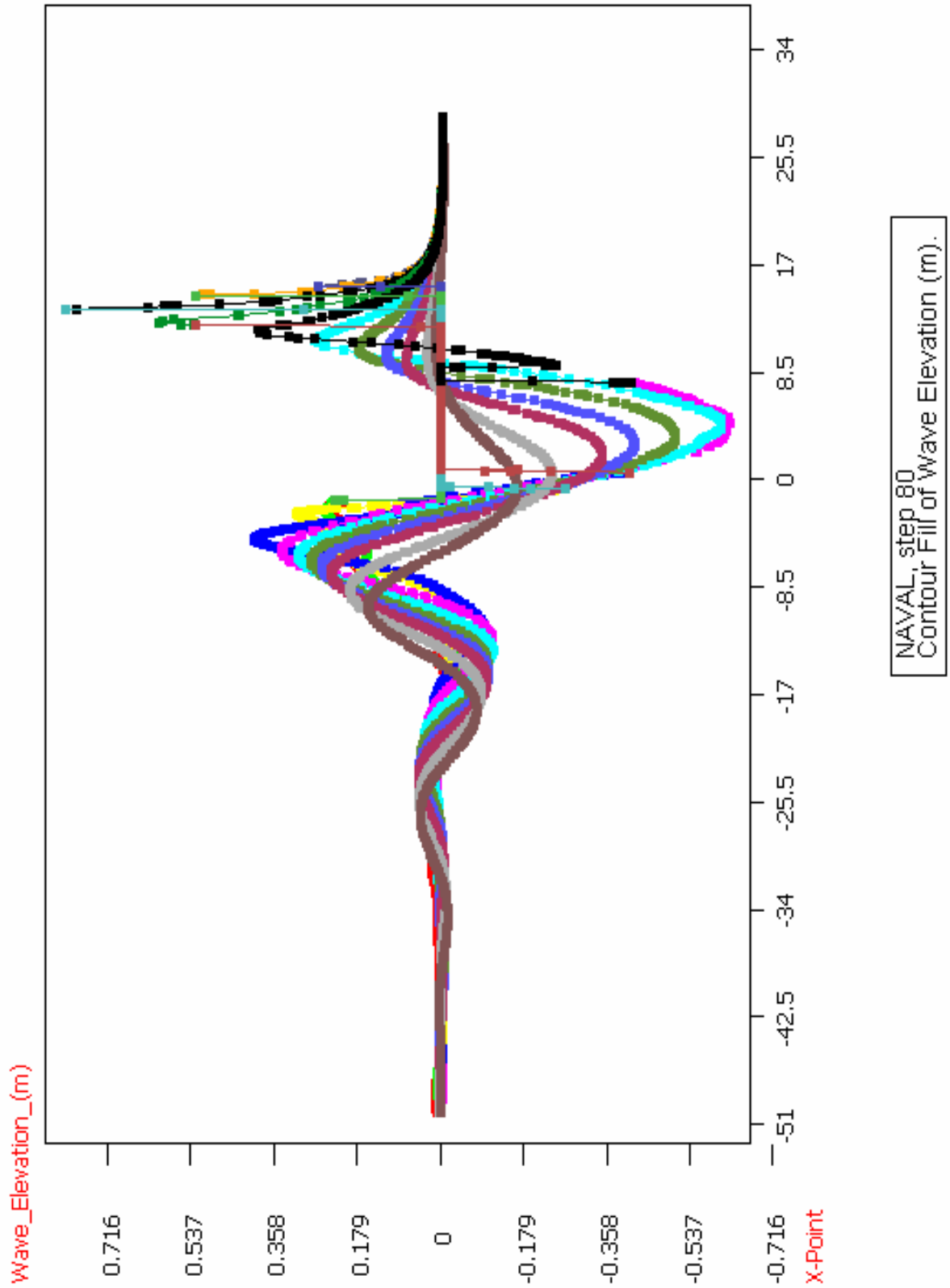
2.5*B



3*B

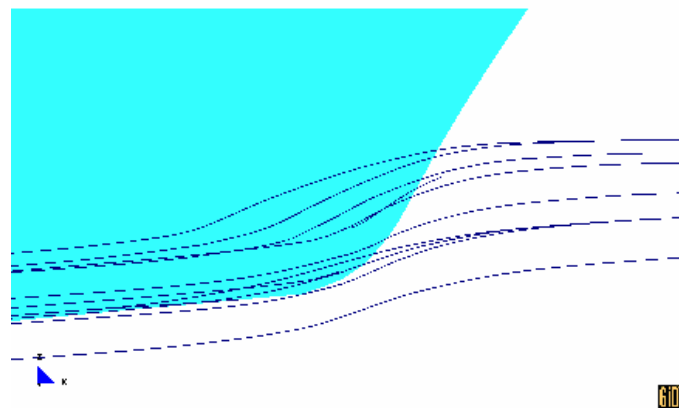
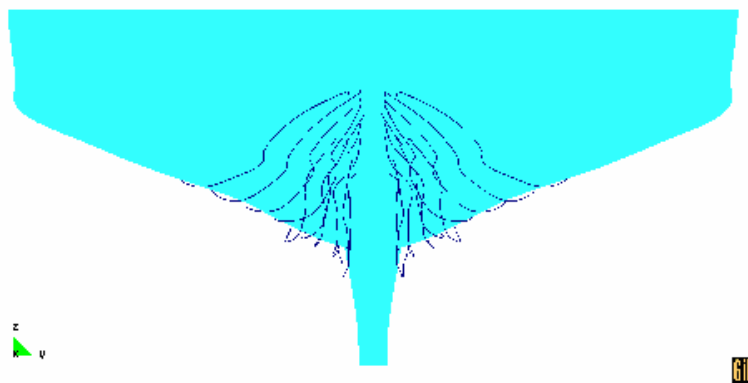
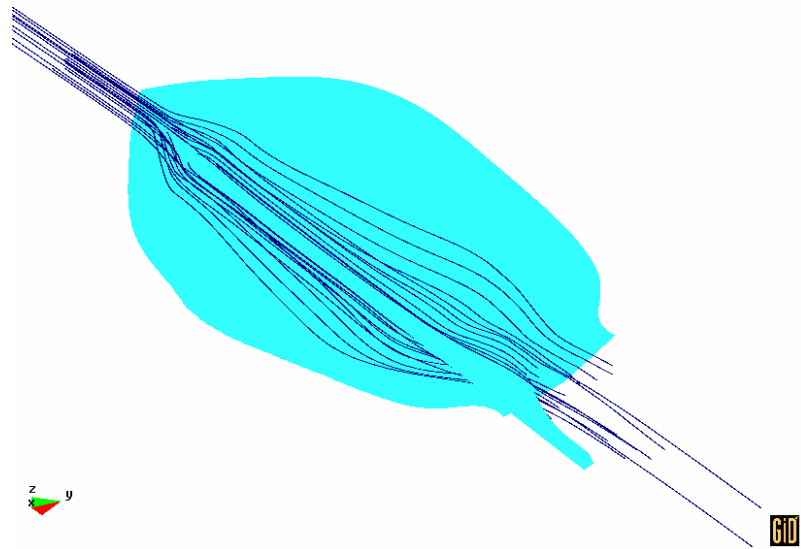


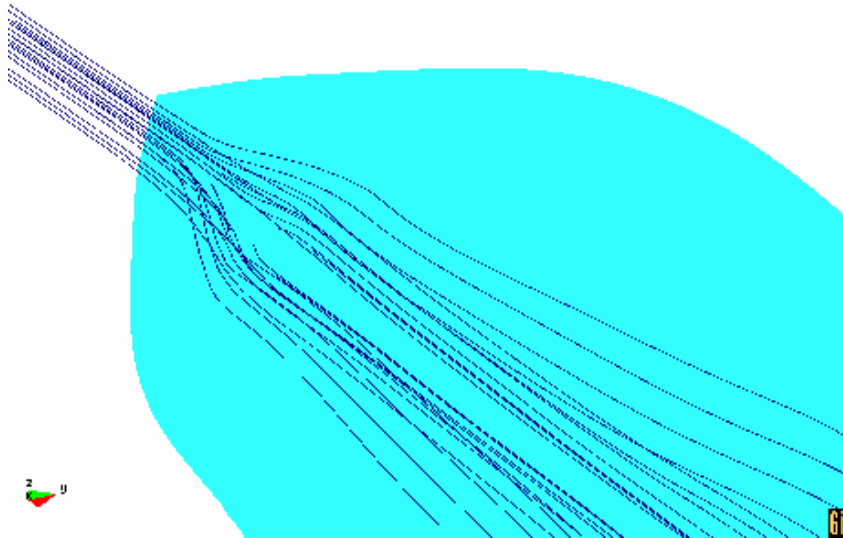
Conjunto de todos los cortes



5.1.4 Distribución de líneas de corriente a lo largo del casco y detalle de algunas zonas

Utilizando las herramientas de Tdyn se pueden visualizar las líneas de corriente a lo largo del casco, estas pueden ser situadas por coordenadas o picando con el cursor del ratón donde se quiera.





5.1.5 Resultado de fuerzas y momentos

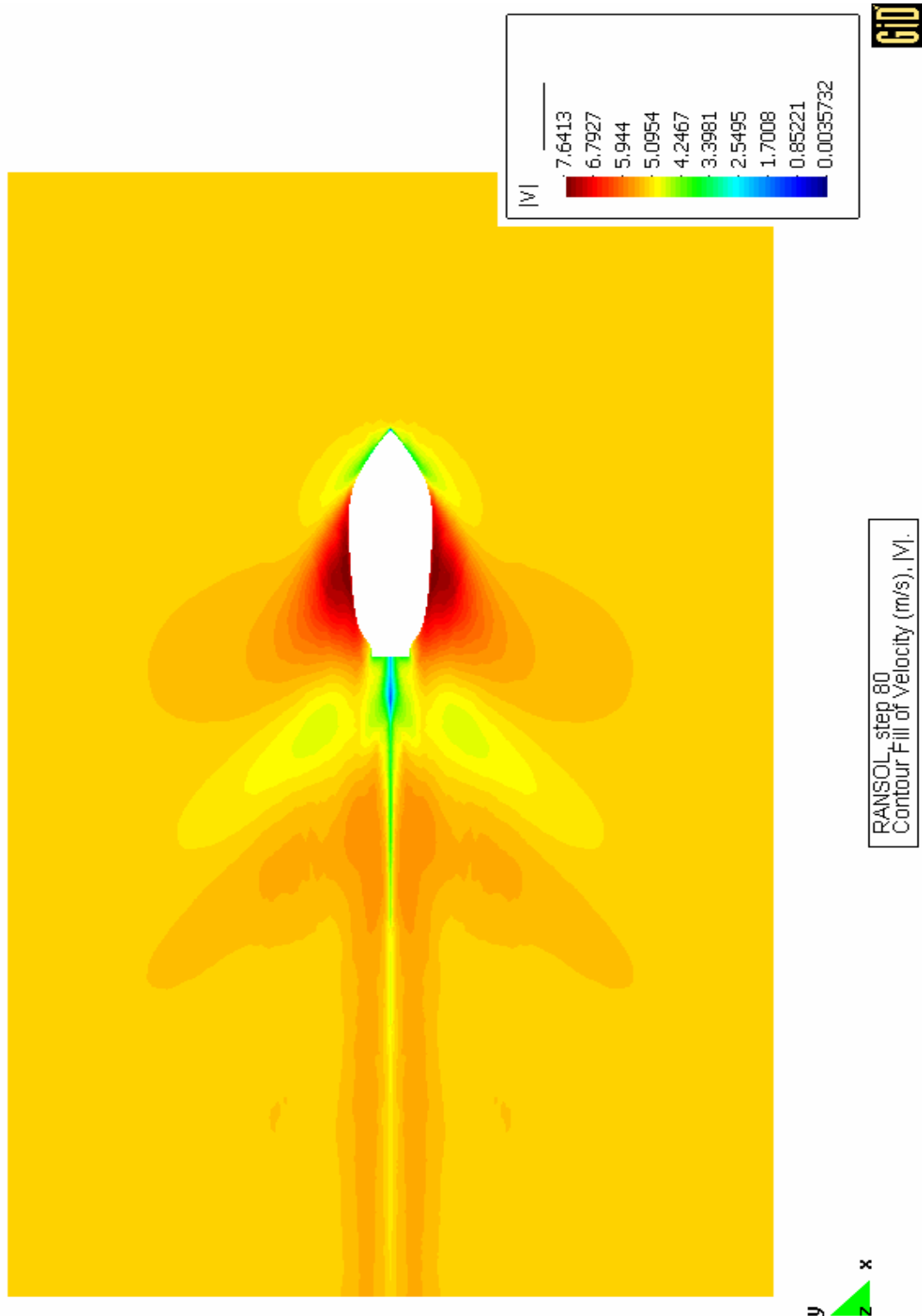
Forma de presentación de los resultados obtenidos por Tdyn en tanto que fuerzas y momentos se refiere.

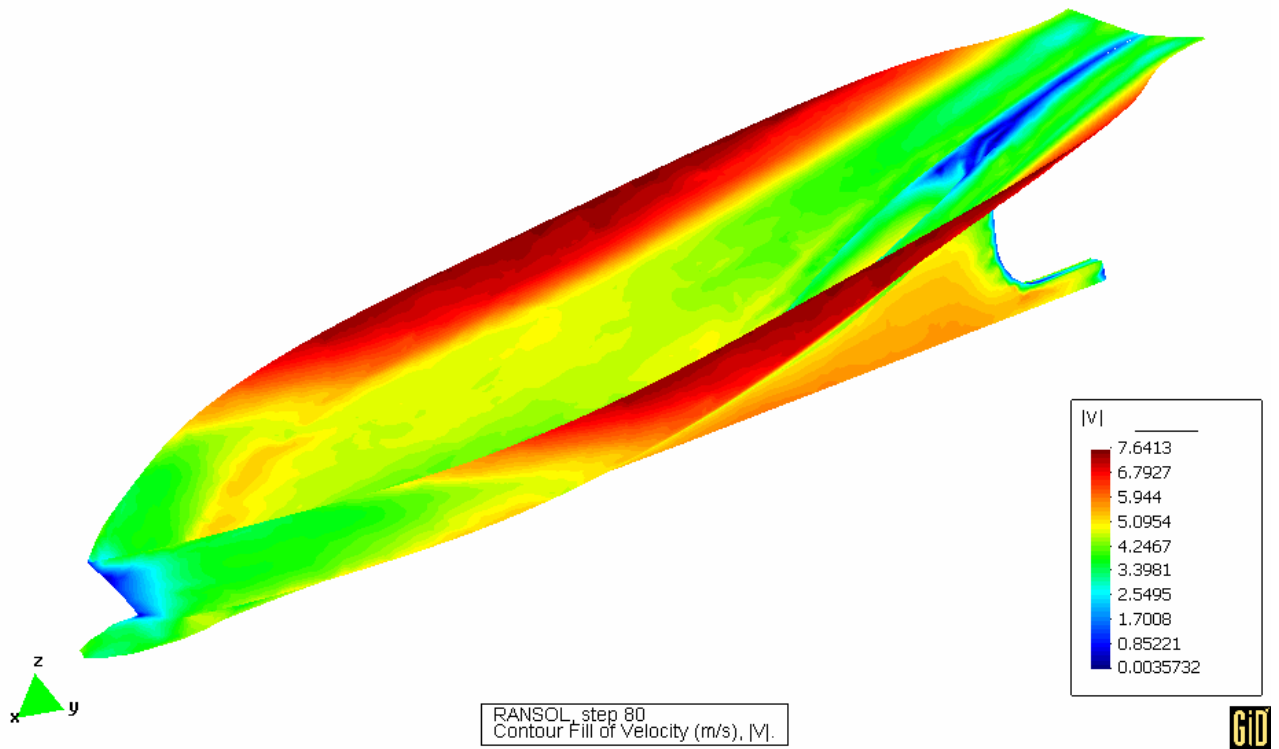
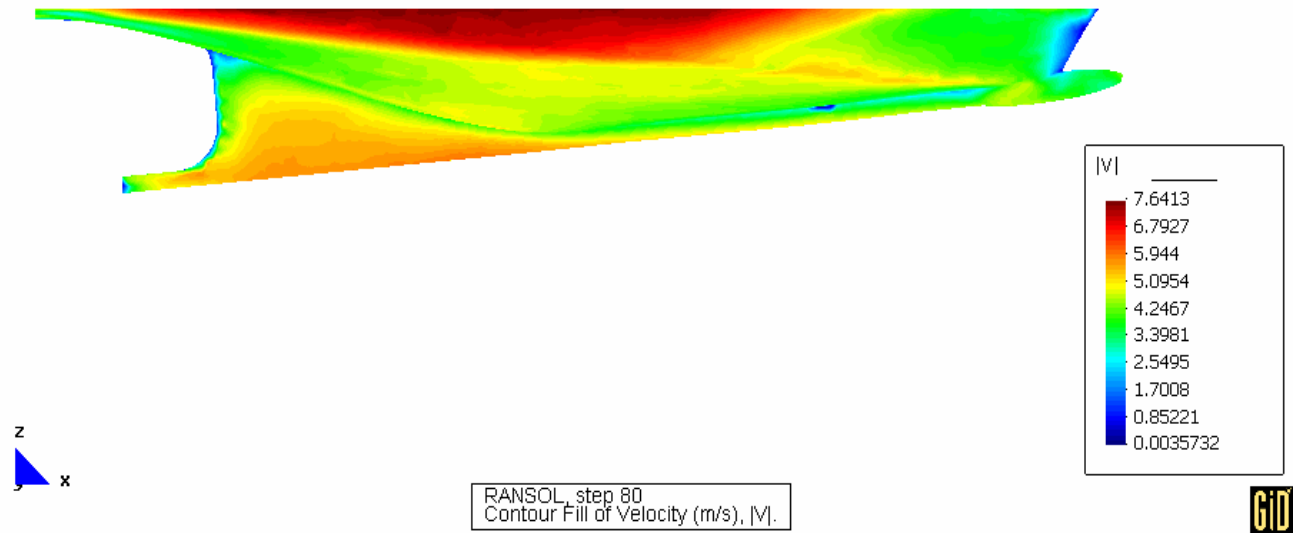
```

Forces on Boundaries
Fluid_Body: (Final step 79.99)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
  -21859      -55833      -82322
Pressure Moments (PMx PMy PMz)
  1.5658e+005  4.2063e+005  -1.7202e+005
Static Pressure Forces (SPx SPy SPz)
  -64.391     2.9178e+005  3.7912e+005
Static Pressure Moments (SMx SMy SMz)
 -5.5071e+005 -2.8598e+006  1.8639e+006
Viscous Forces (VFX VFY VFZ)
  -1750       33.19        -14.834
Viscous Moments (VMx VMY VMZ)
  -28.253     -1093        -2999.7
Total Forces
  -23673      2.3598e+005  2.9679e+005
Total Moments
 -3.9416e+005 -2.4402e+006  1.6888e+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
  Units are OutPut Units defined by the user
    
```

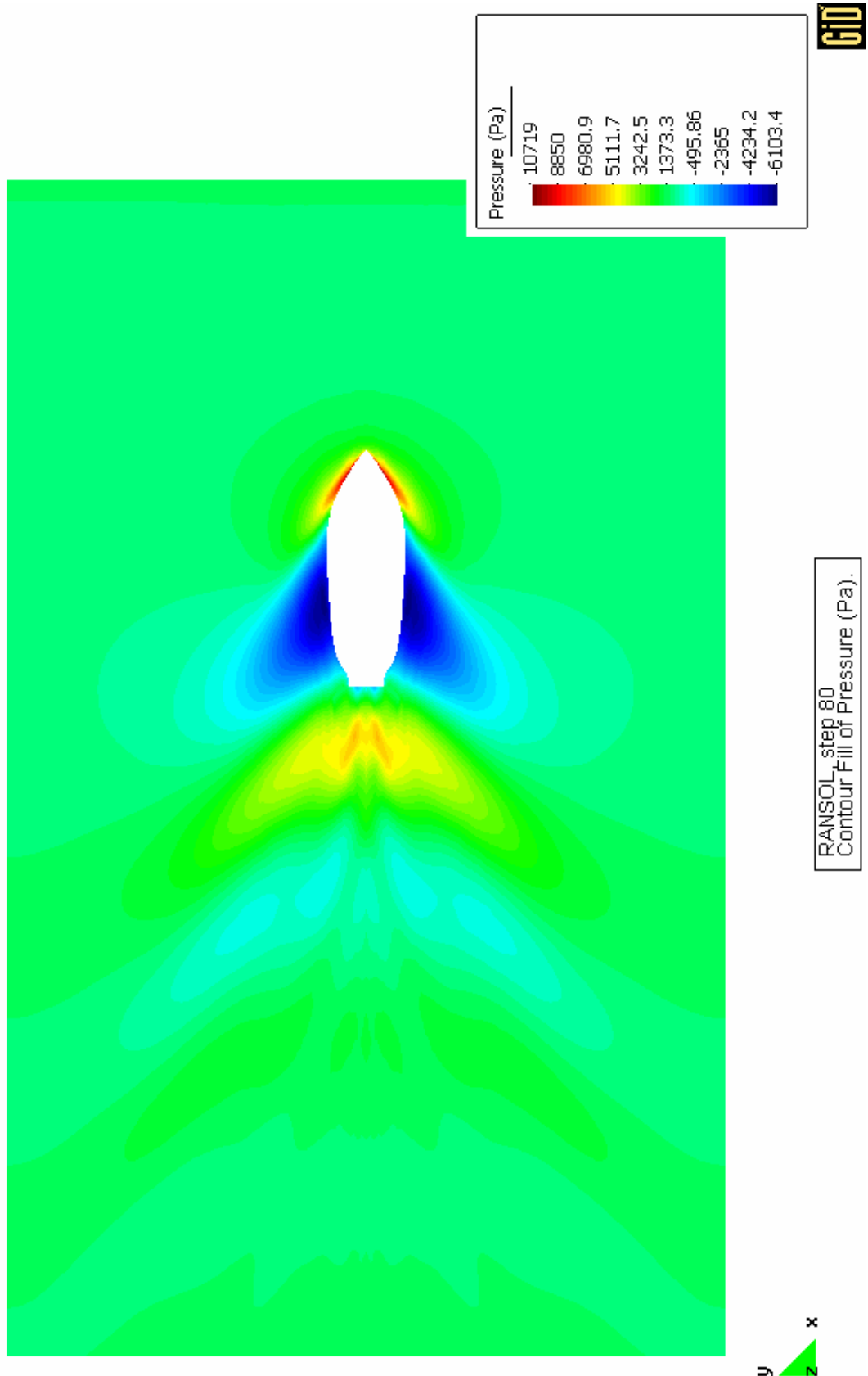

5.2 Resultados correspondientes a la carena con bulbo 1

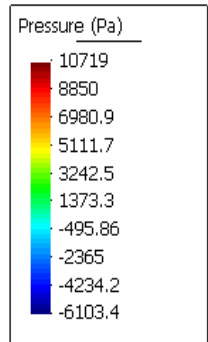
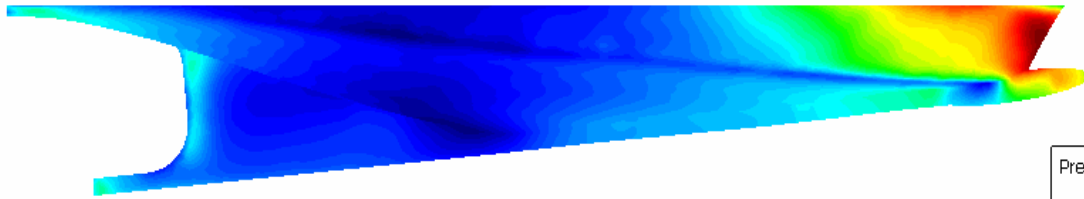
5.2.1 Distribución de velocidades, todas las velocidades están en m/s



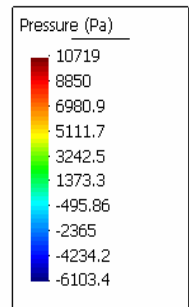
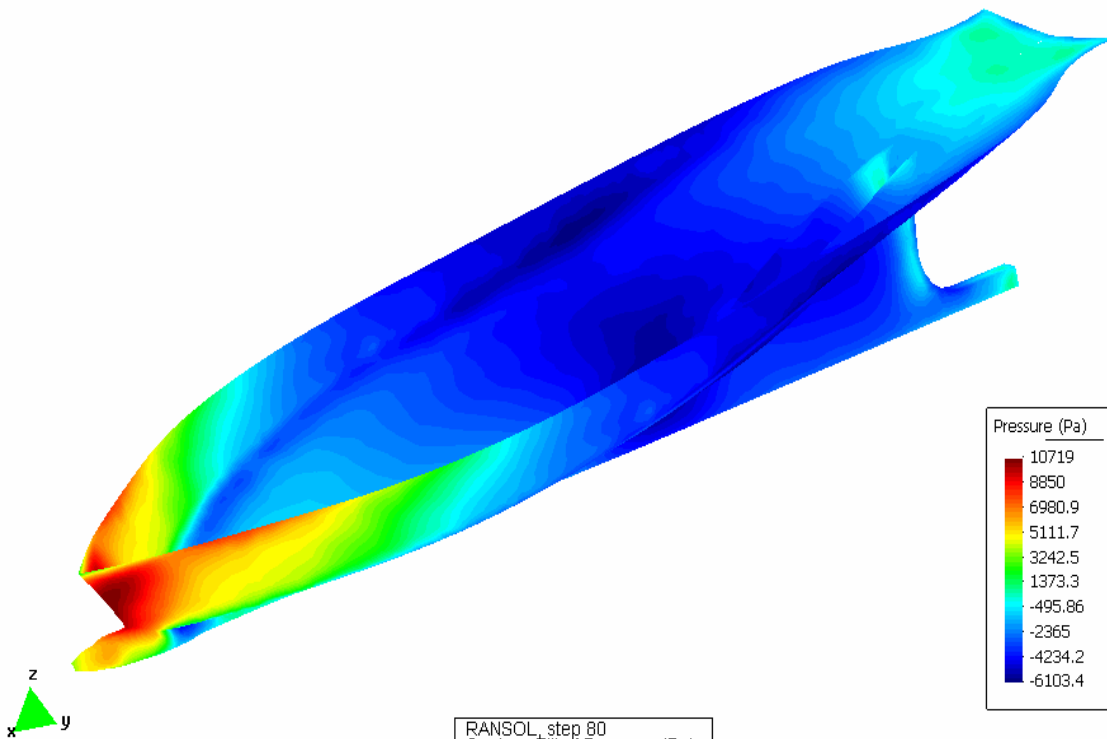


5.2.2 Distribución de presiones a 11 nudos





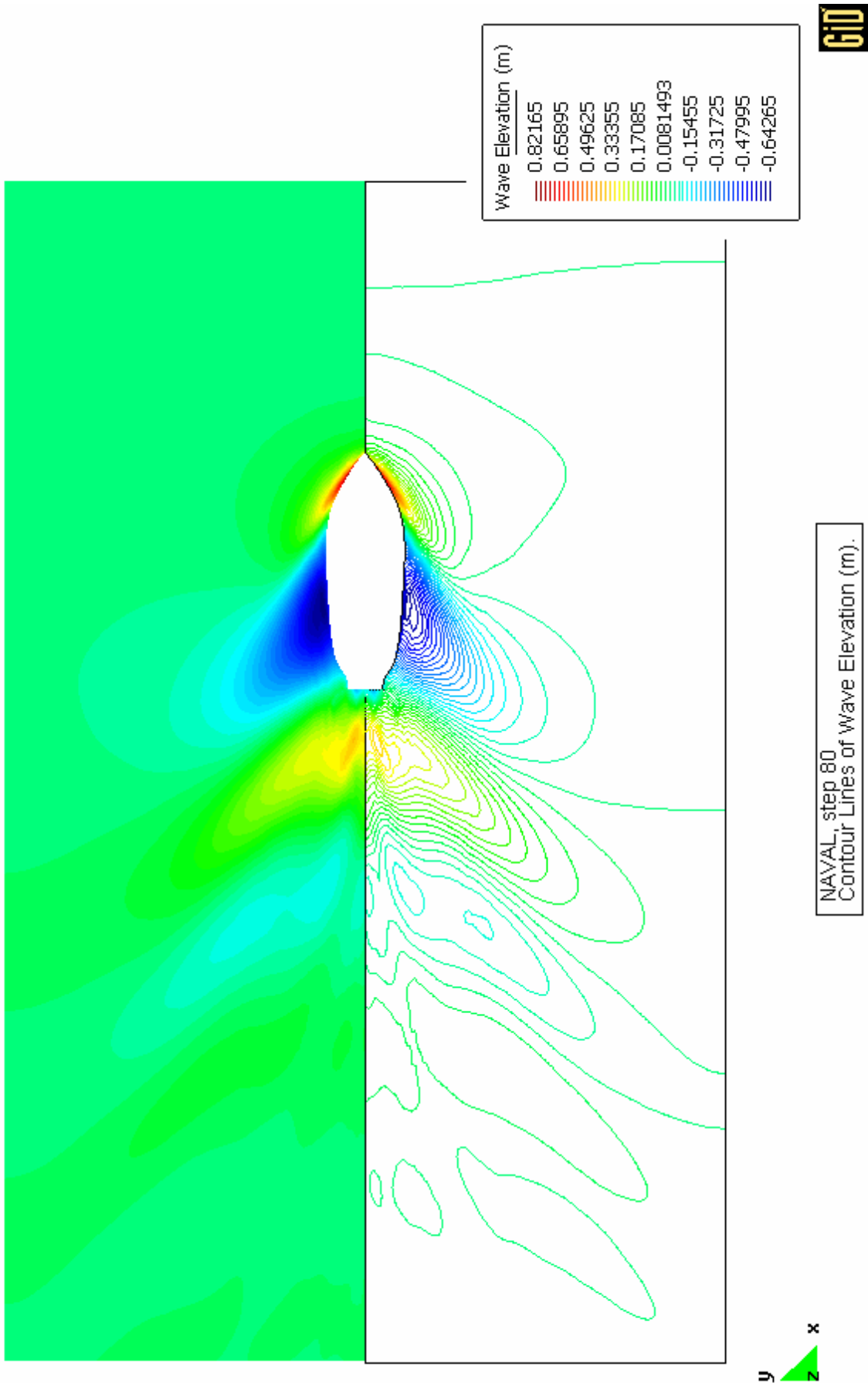
RANSOL, step 80
Contour Fill of Pressure (Pa).



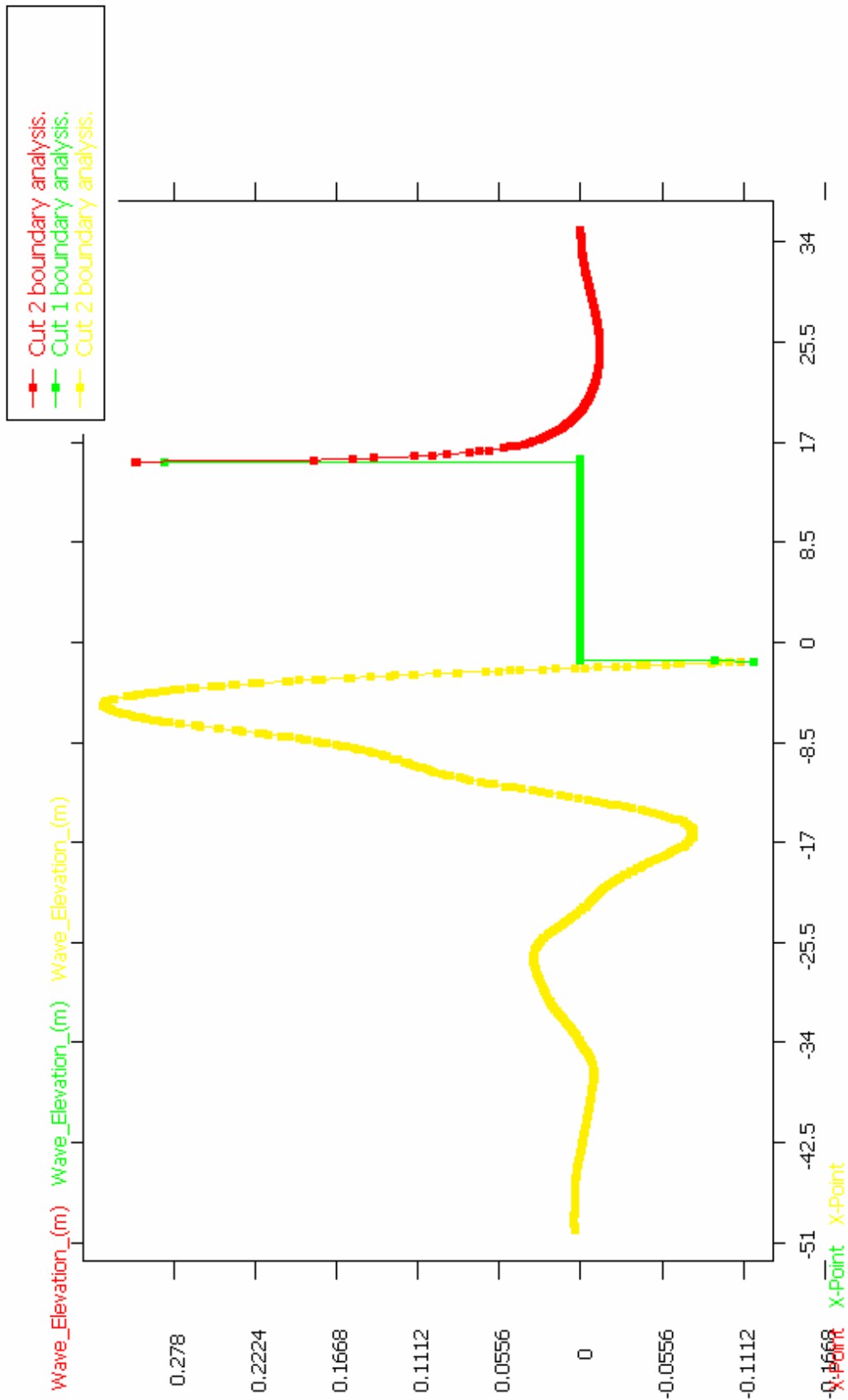
RANSOL, step 80
Contour Fill of Pressure (Pa).



5.2.3 Mapa de olas y cortes



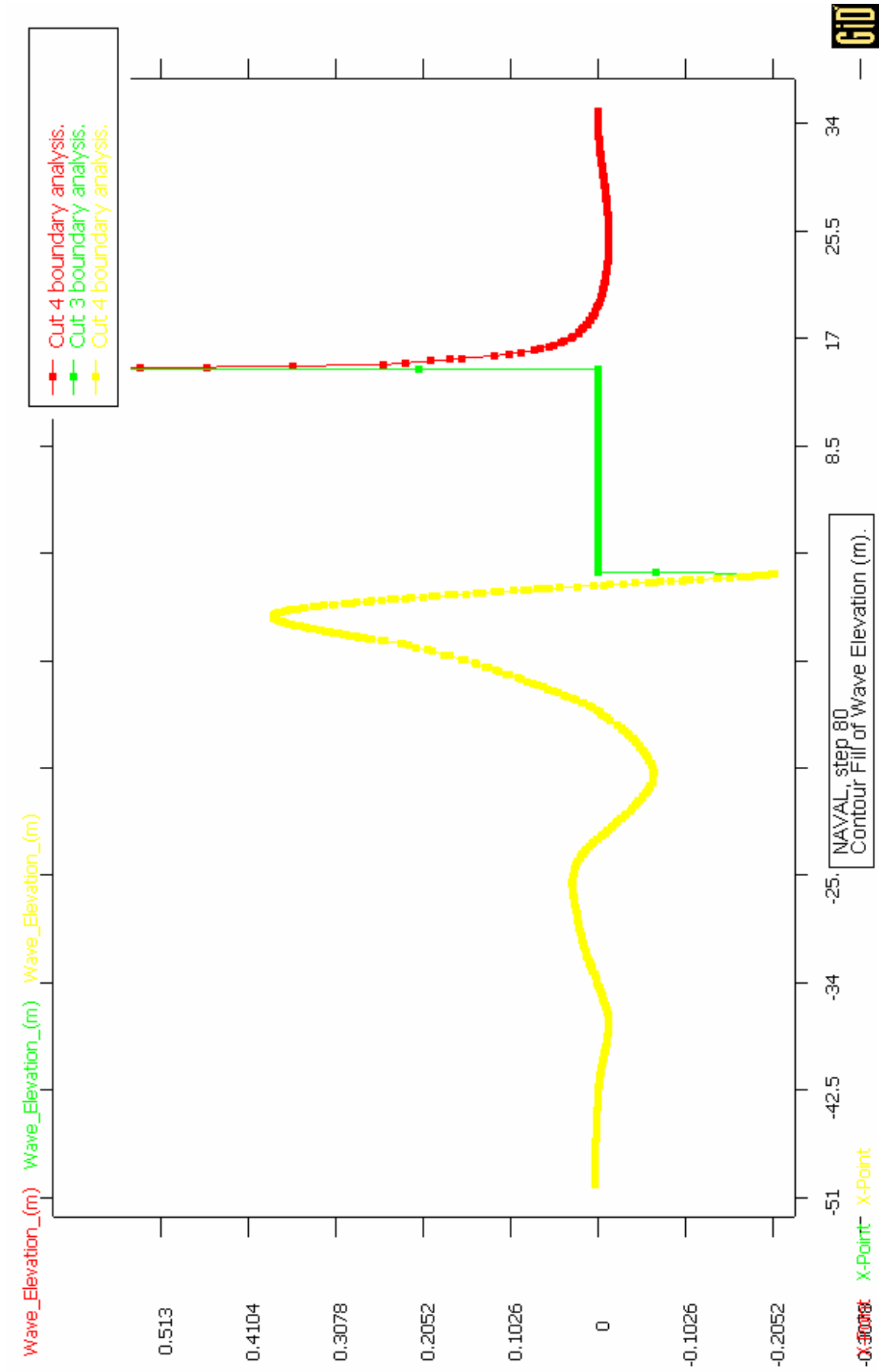
Crujía



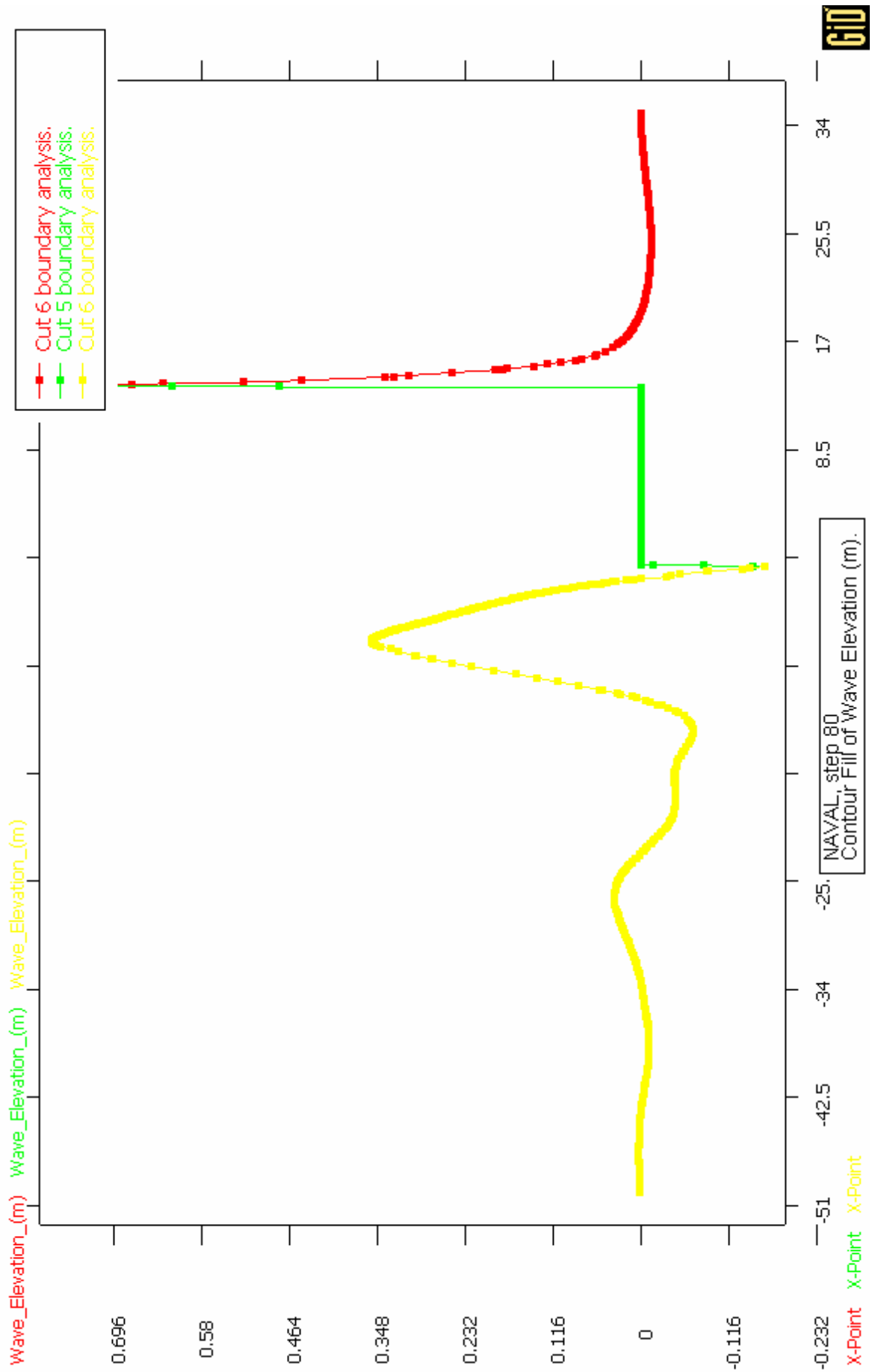
NAVAL_step 80
Contour Fill of Wave Elevation (m).



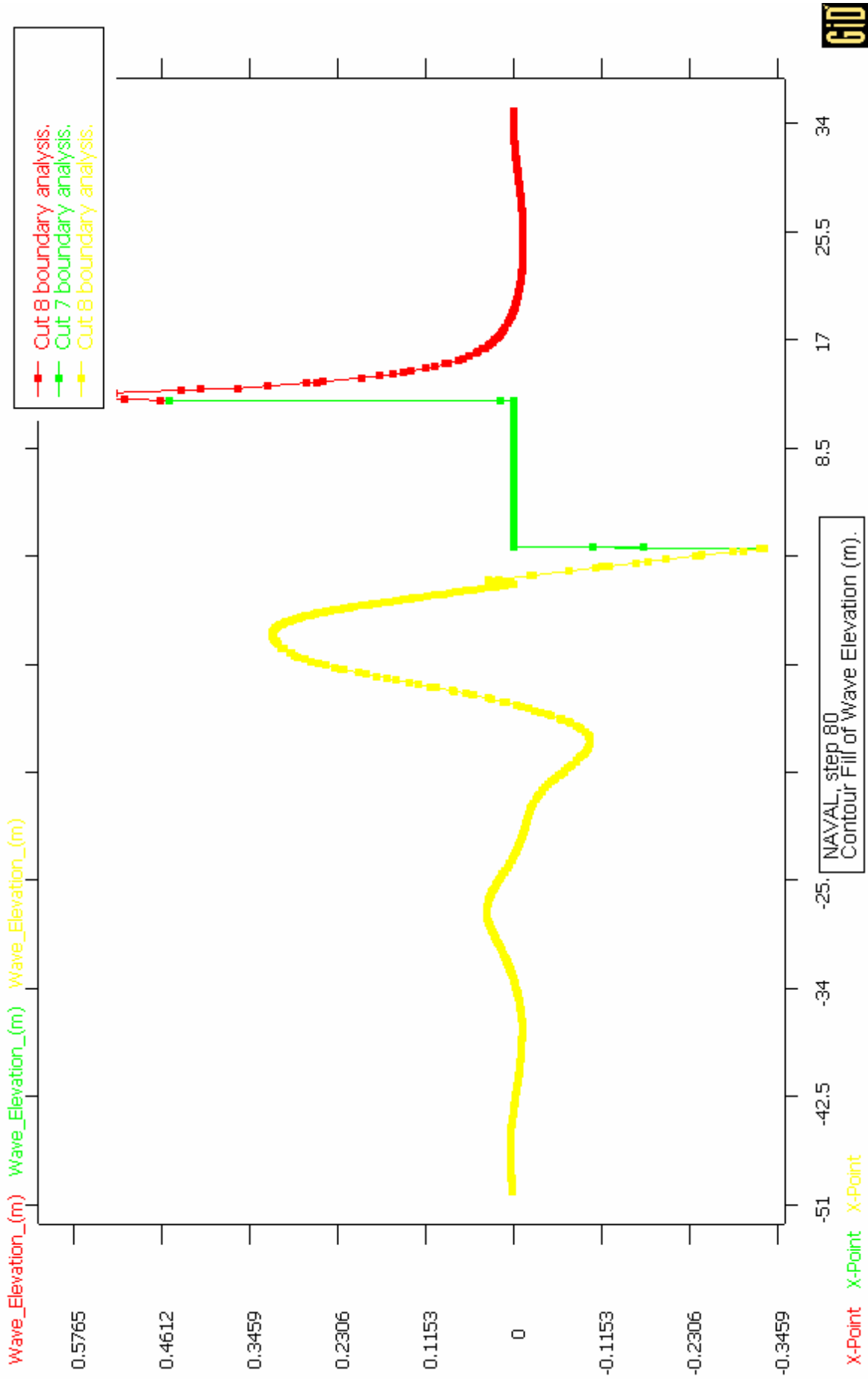
0.25*B



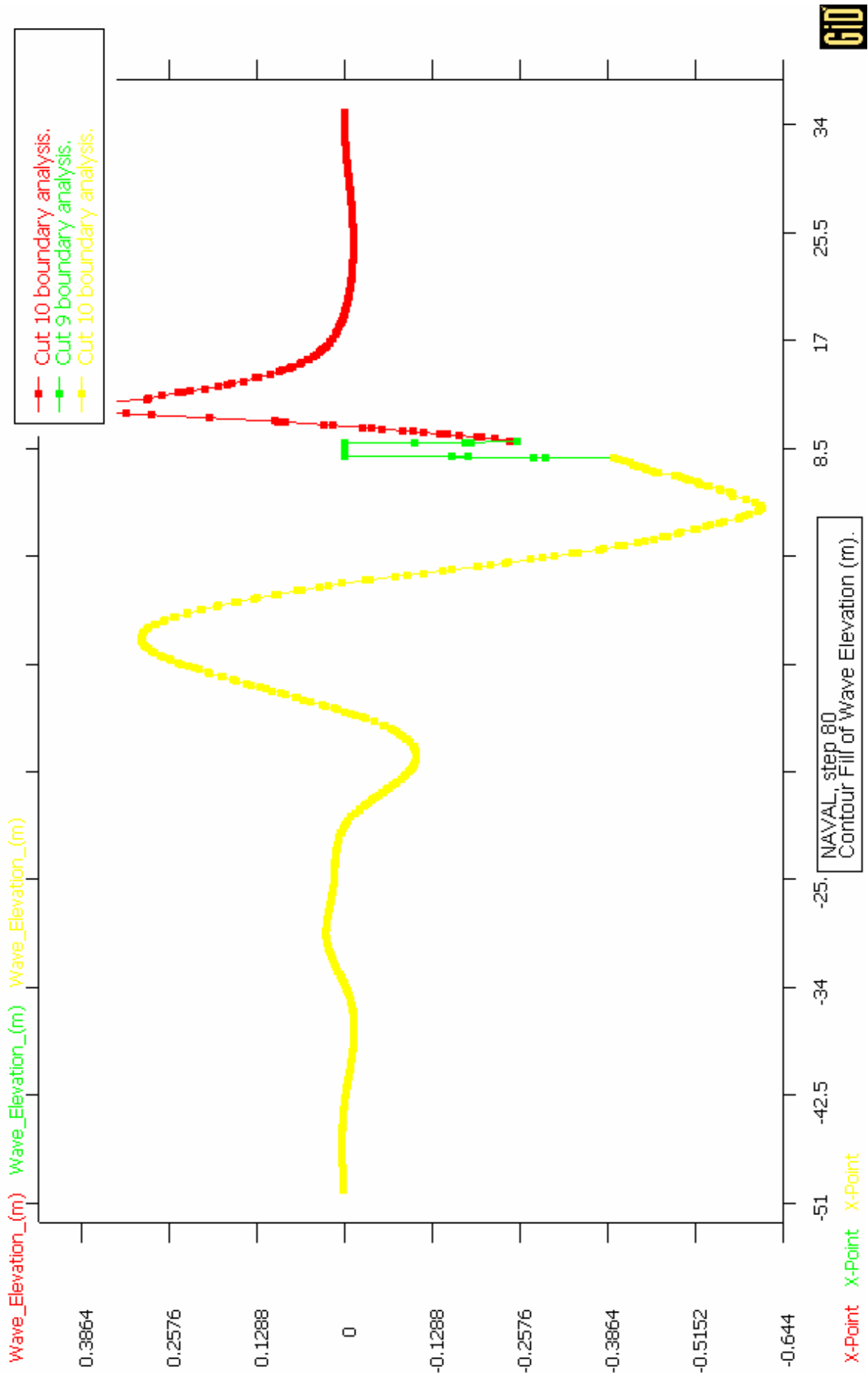
0.5*B



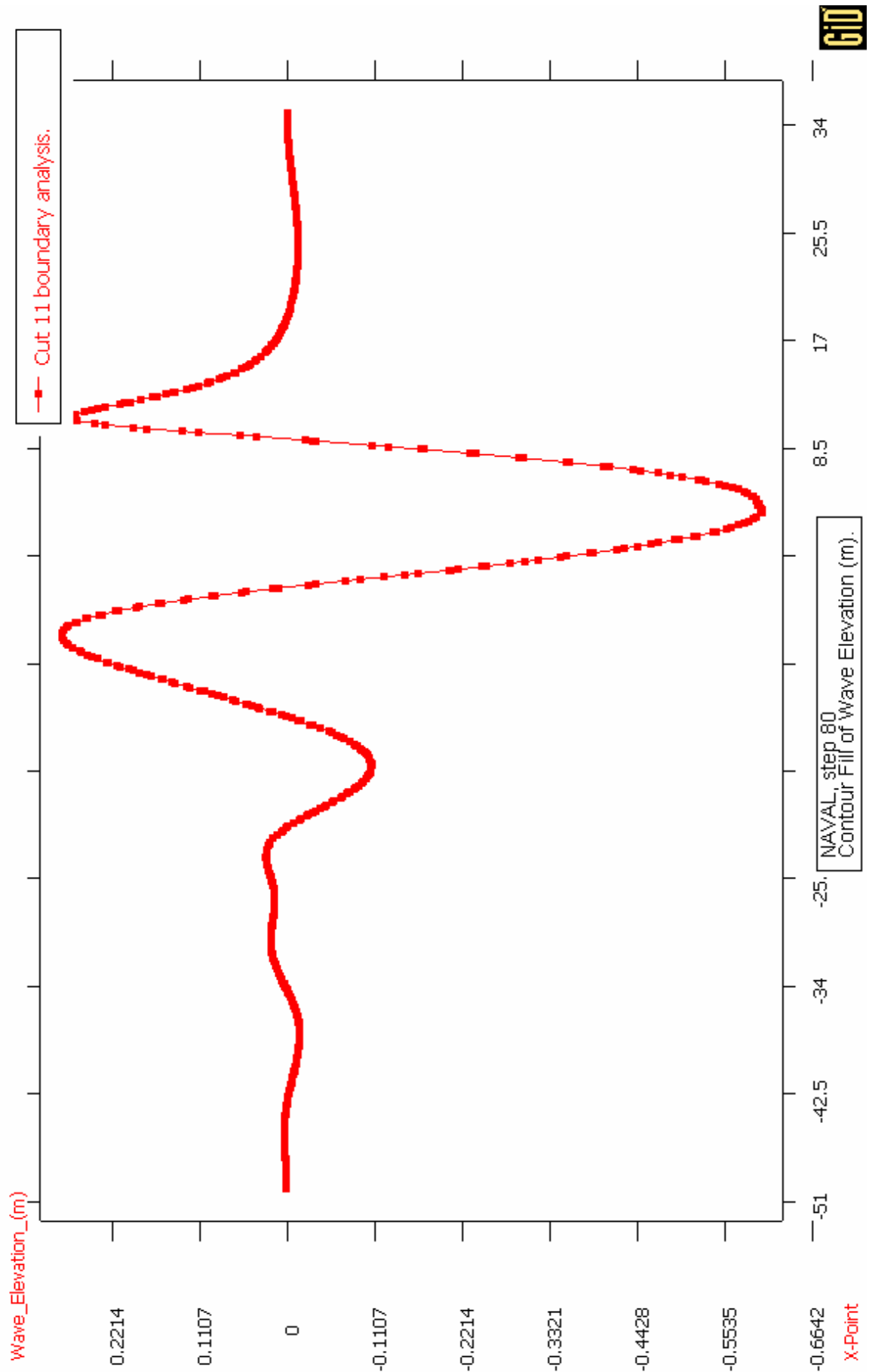
0.75*B



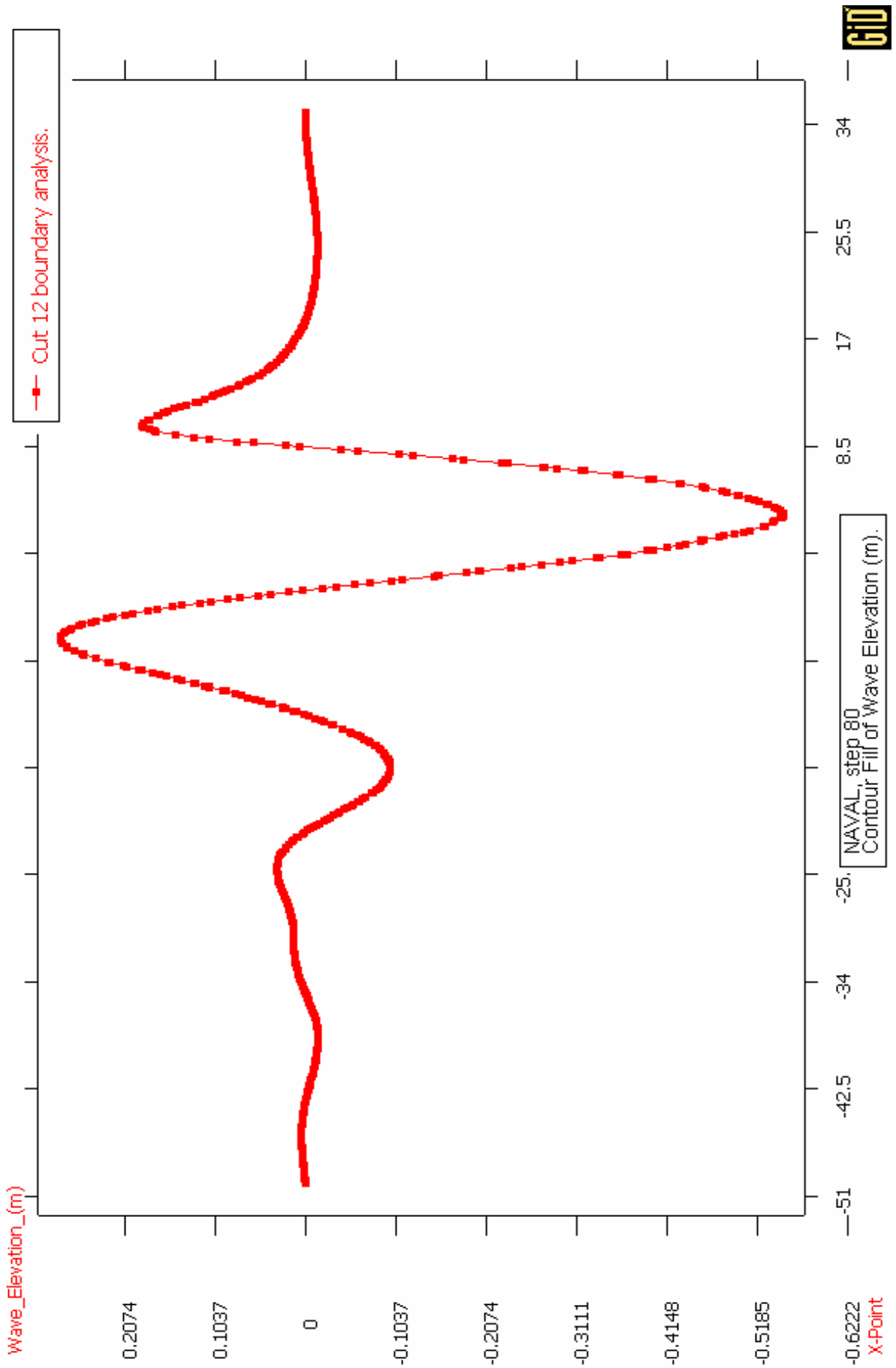
B



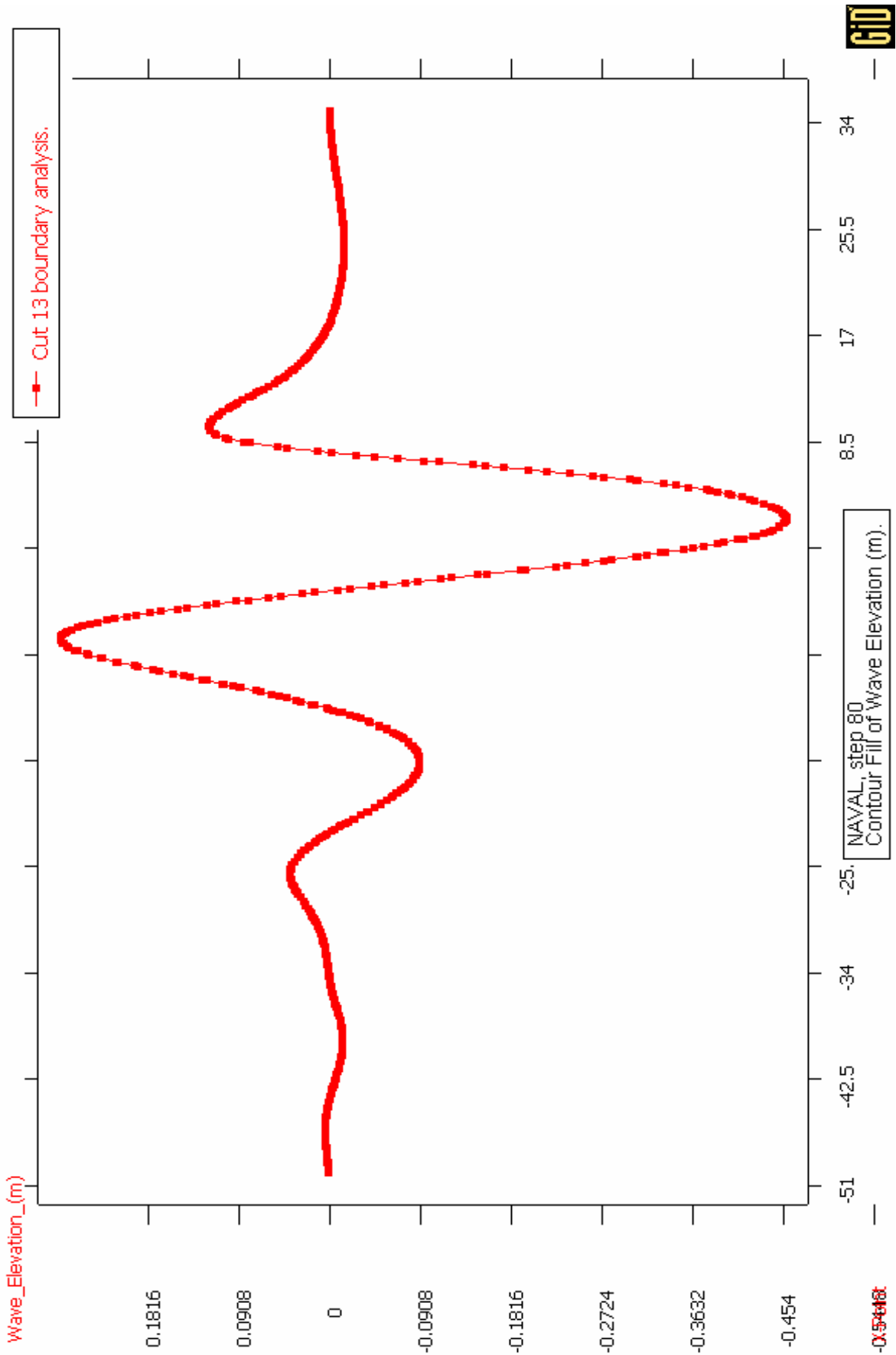
1.25*B



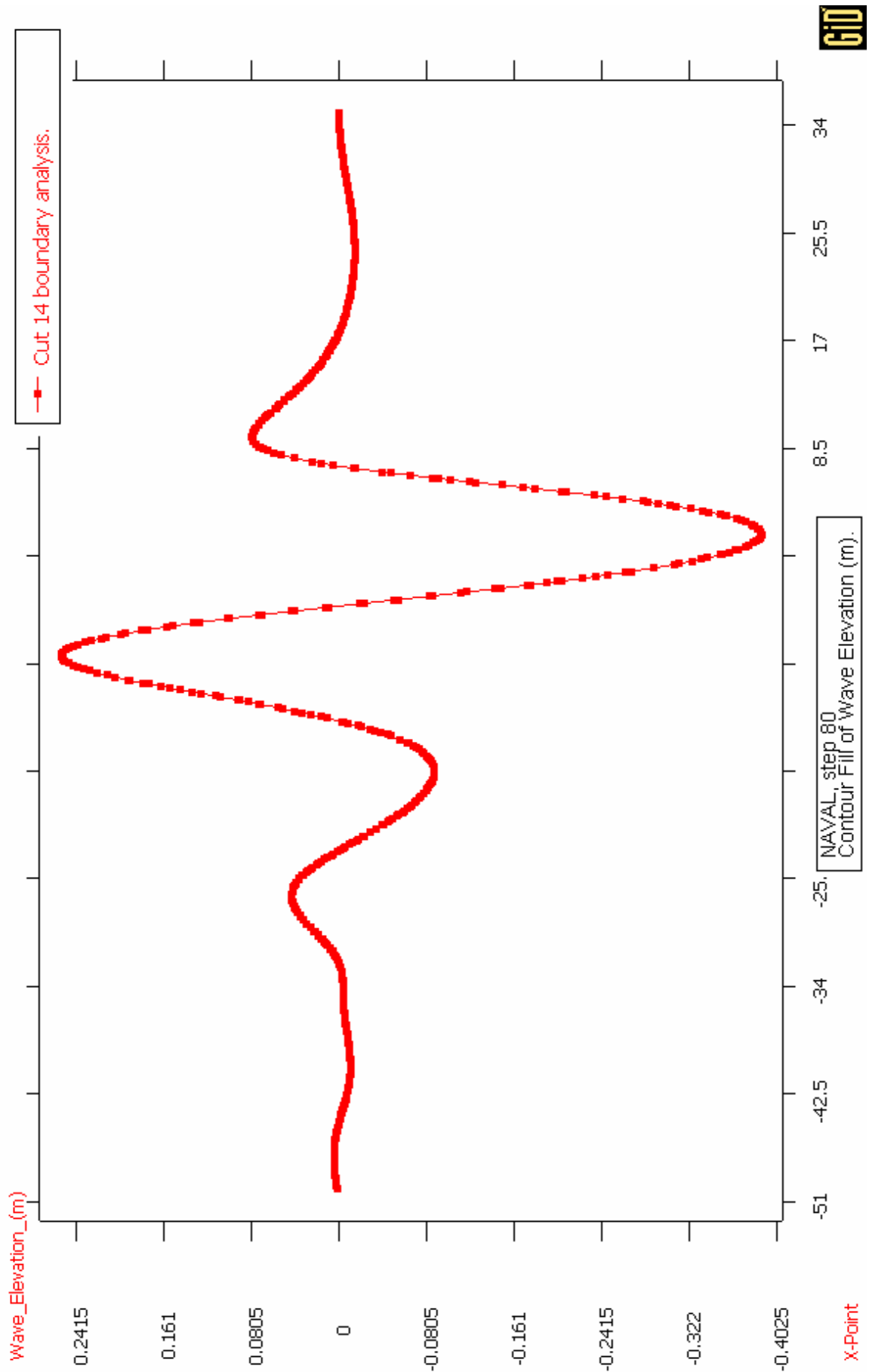
1.50*B



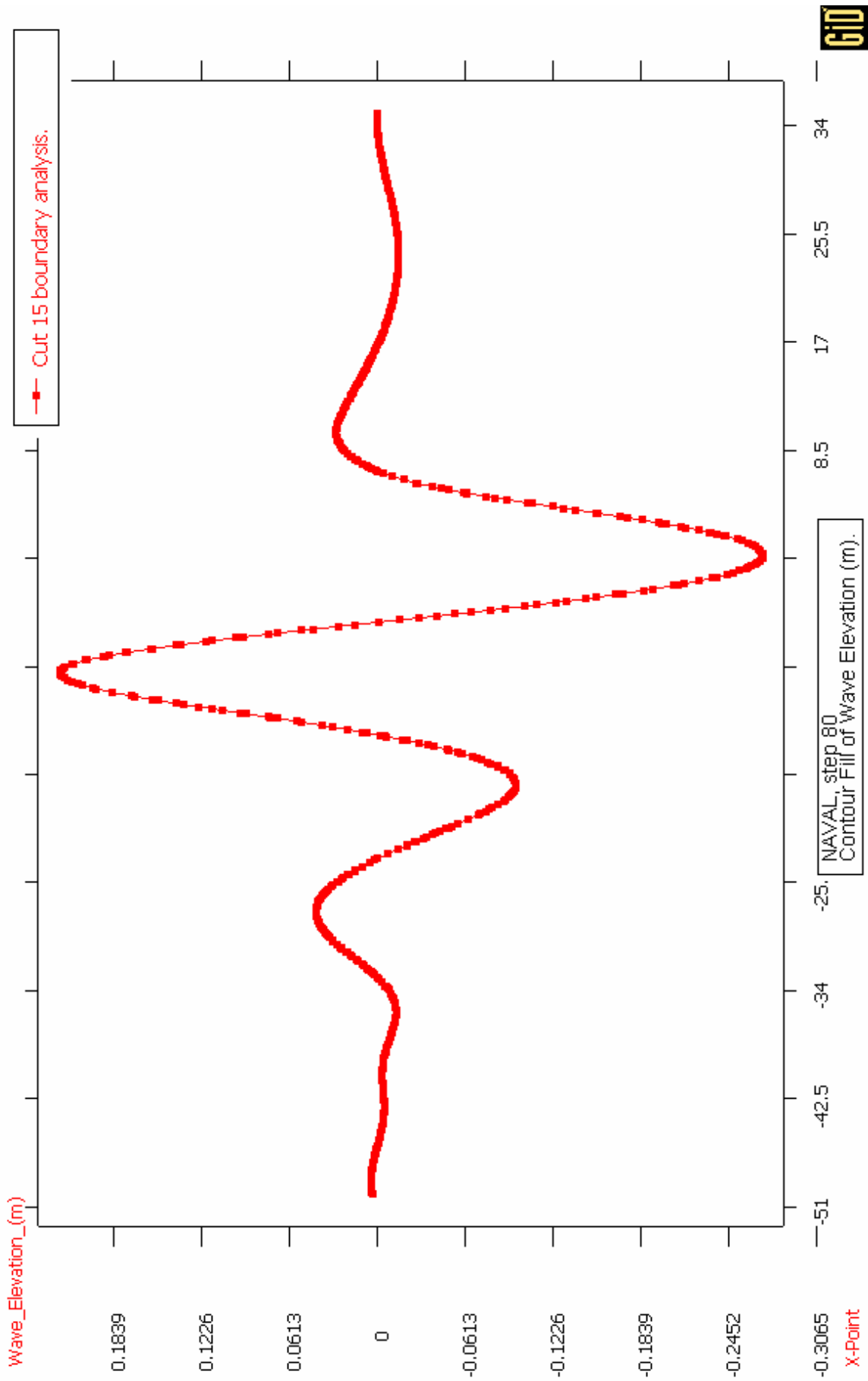
1.75*B



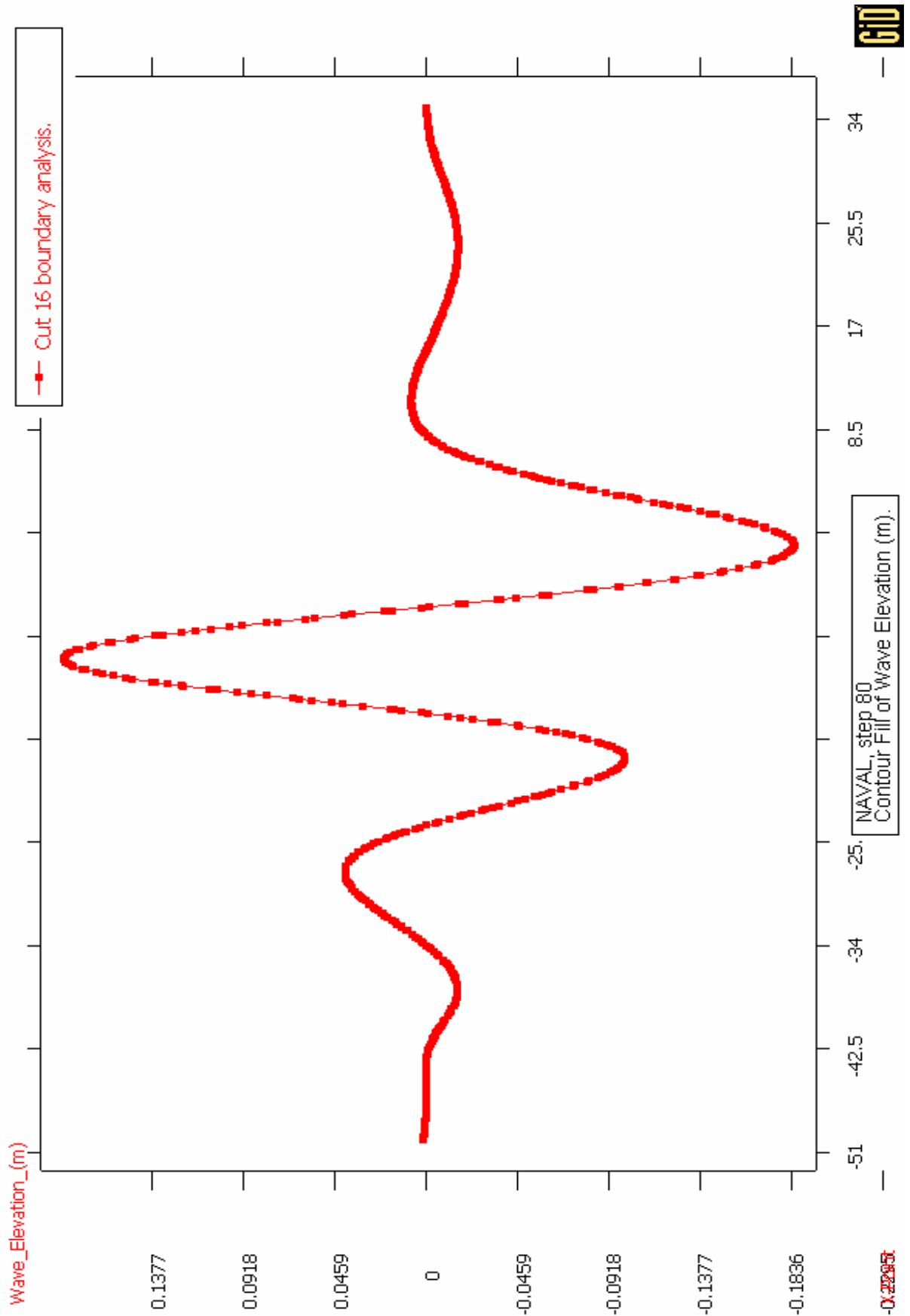
2*B



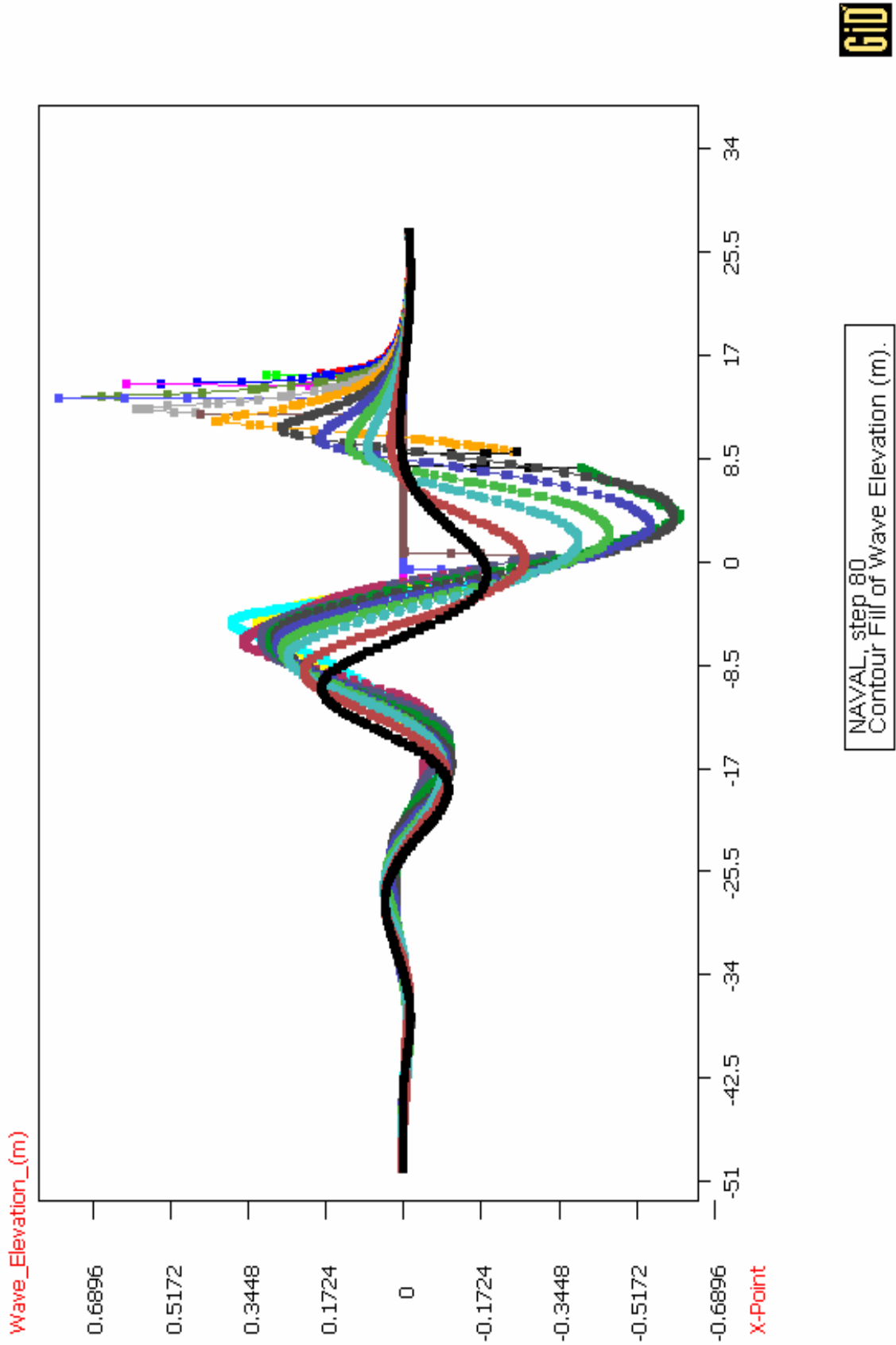
2.5*B



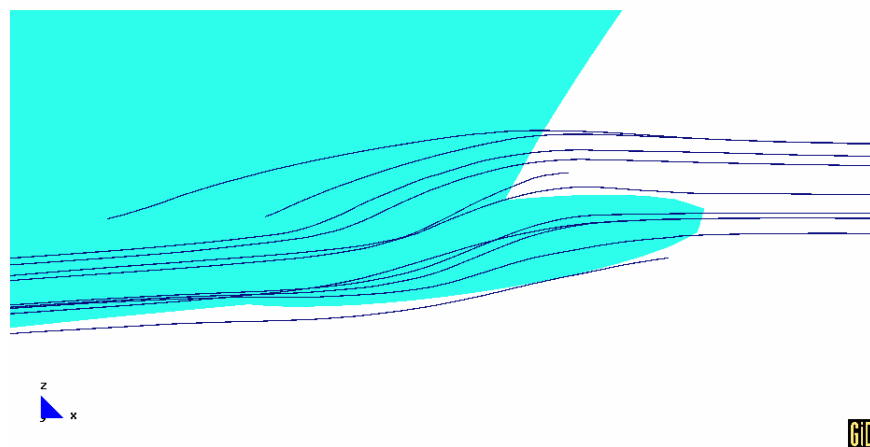
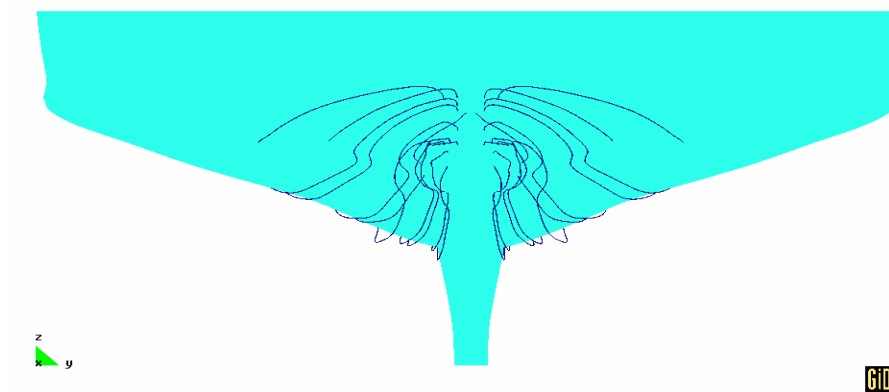
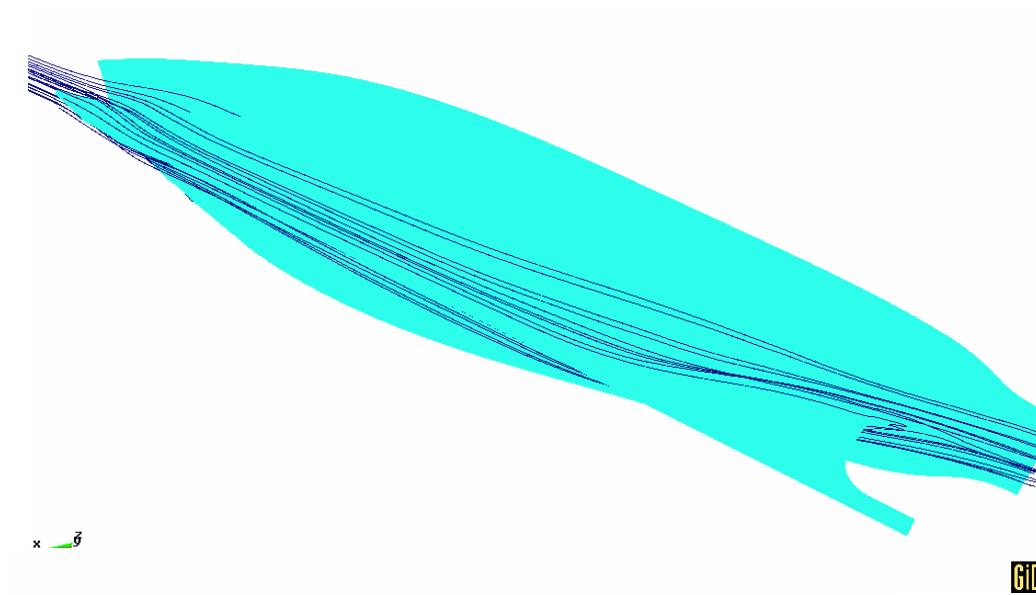
3*B

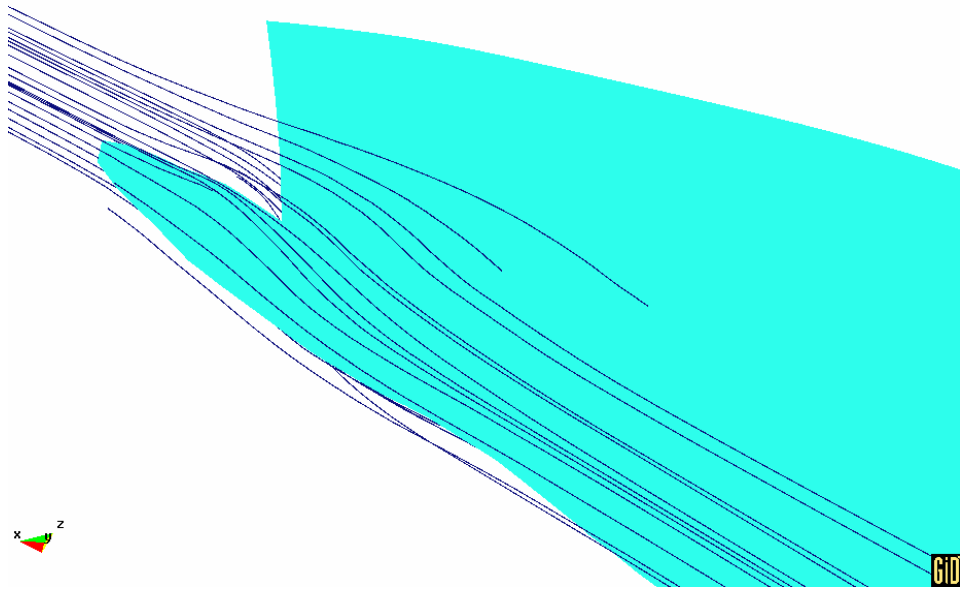


Conjunto de todos los cortes

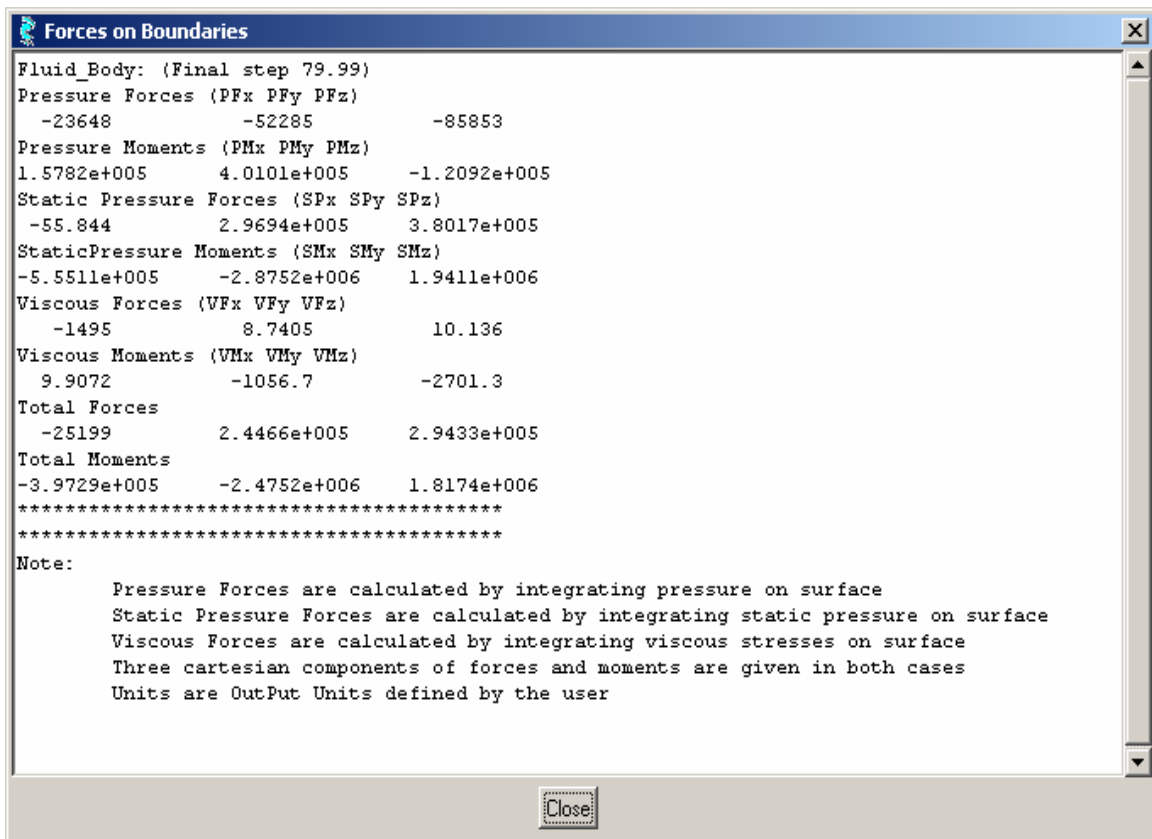


5.2.4 Distribución de líneas de corriente a lo largo del casco y detalle de algunas zonas





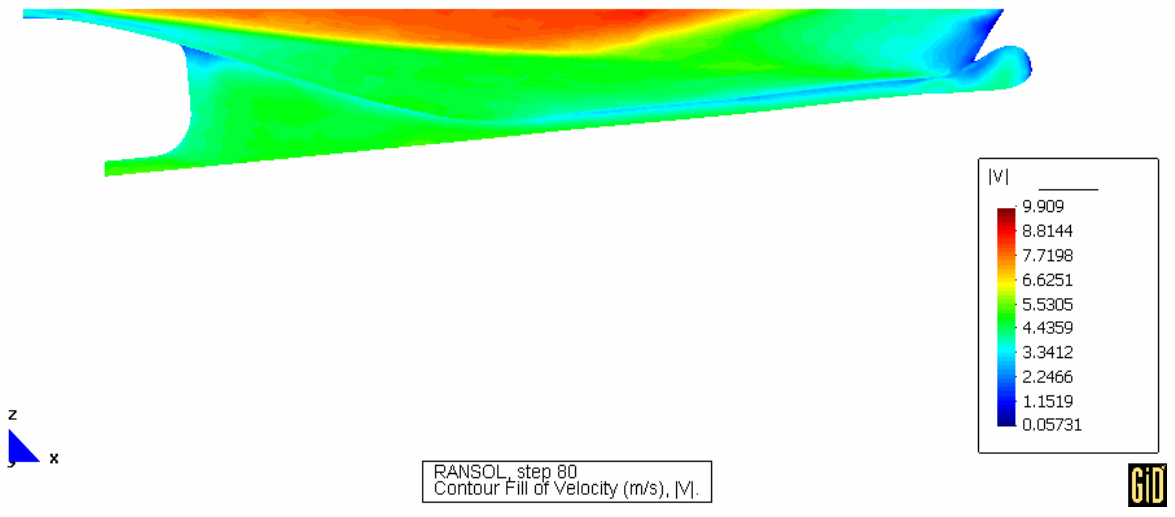
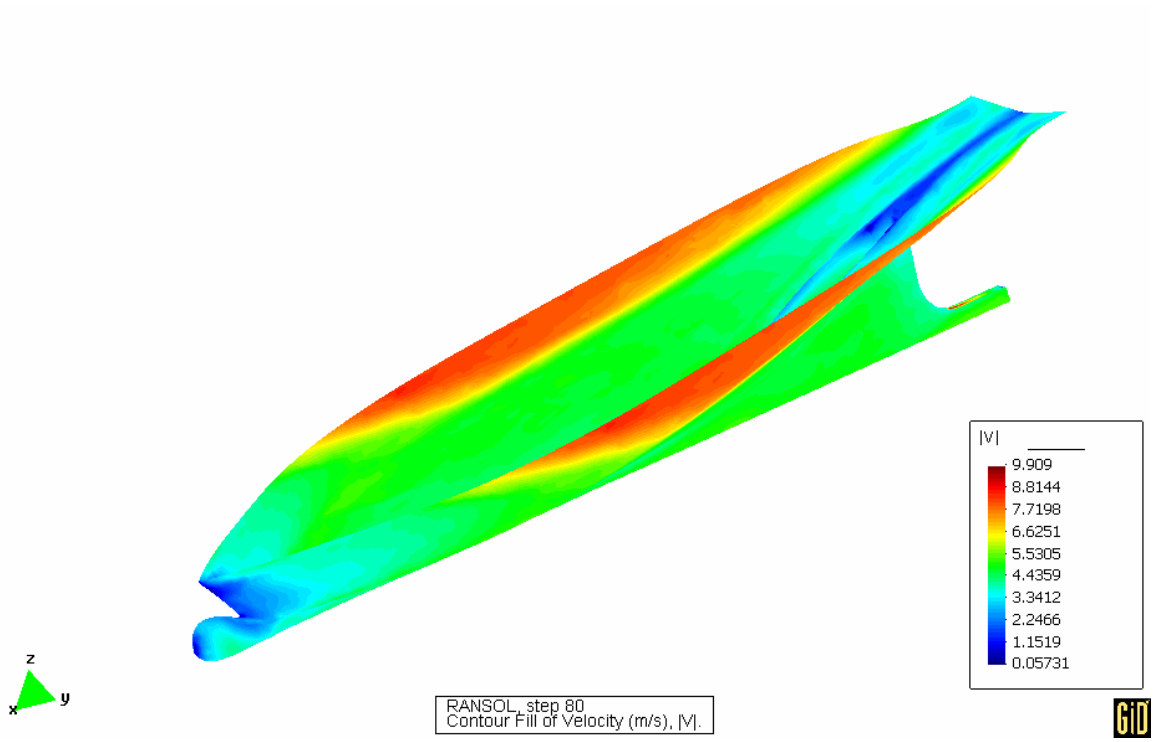
5.2.5 Resultado de fuerzas y momentos



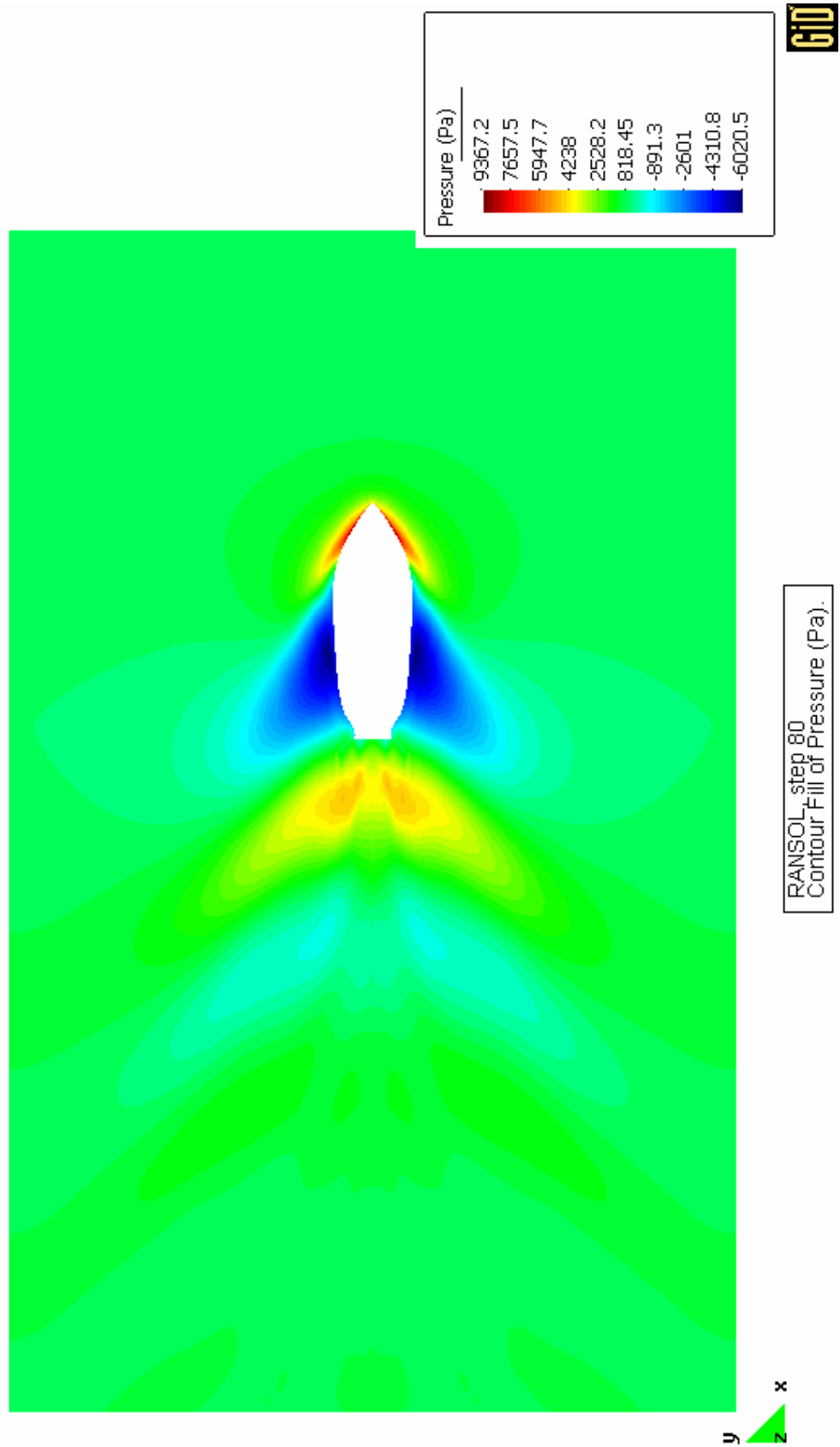
5.3 Resultados correspondientes a la carena con bulbo 2

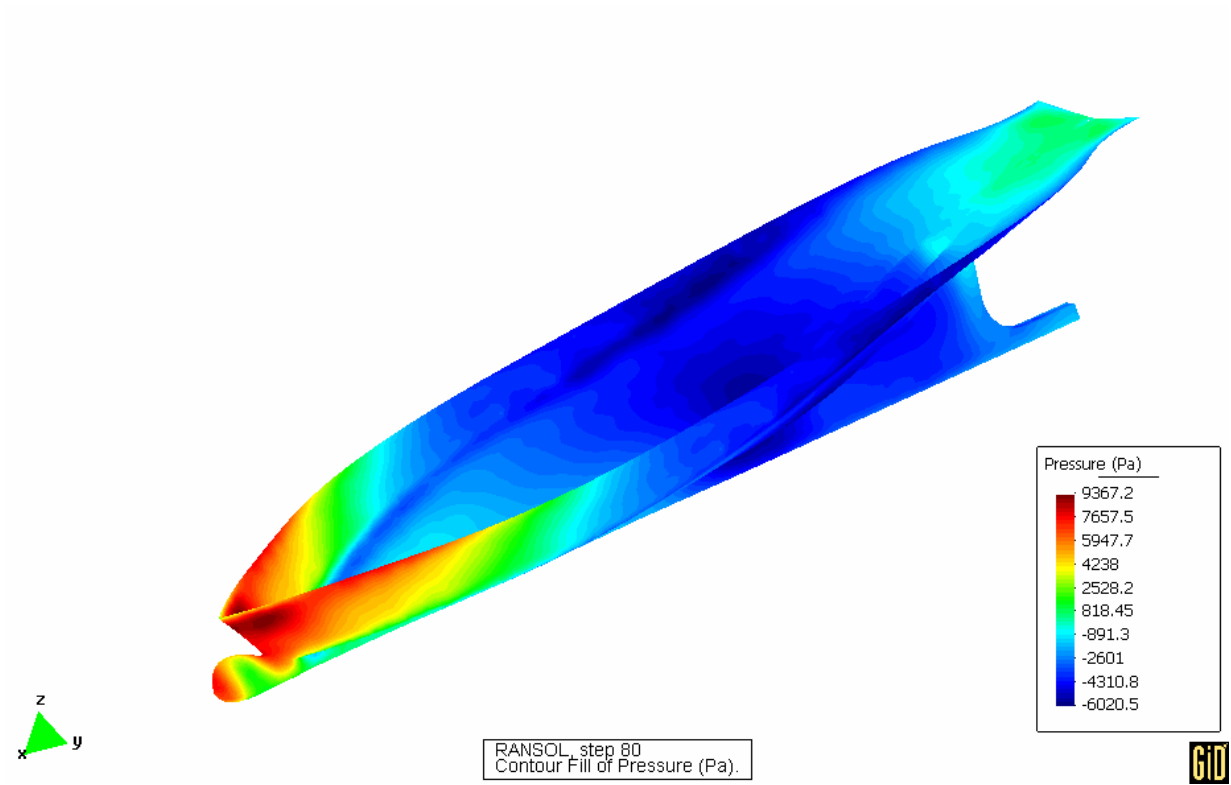
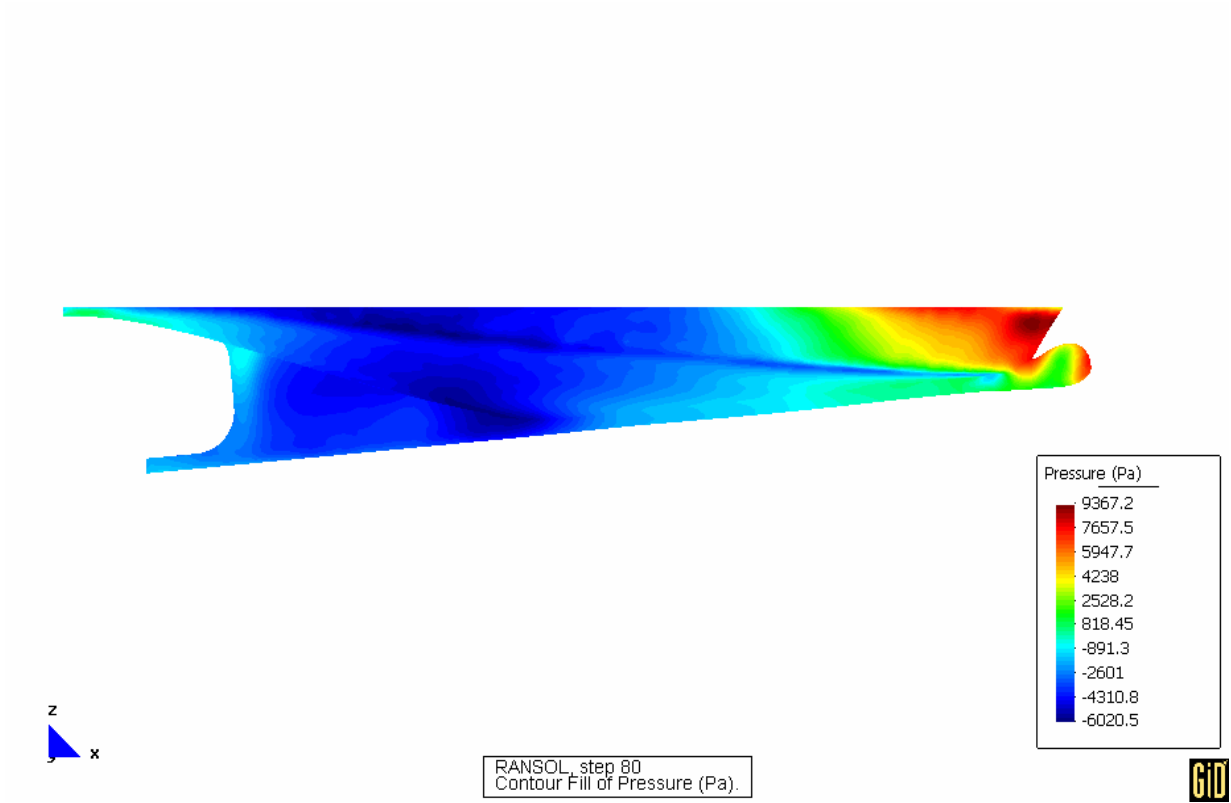
5.3.1 Distribución de velocidades, todas las velocidades están en m/s



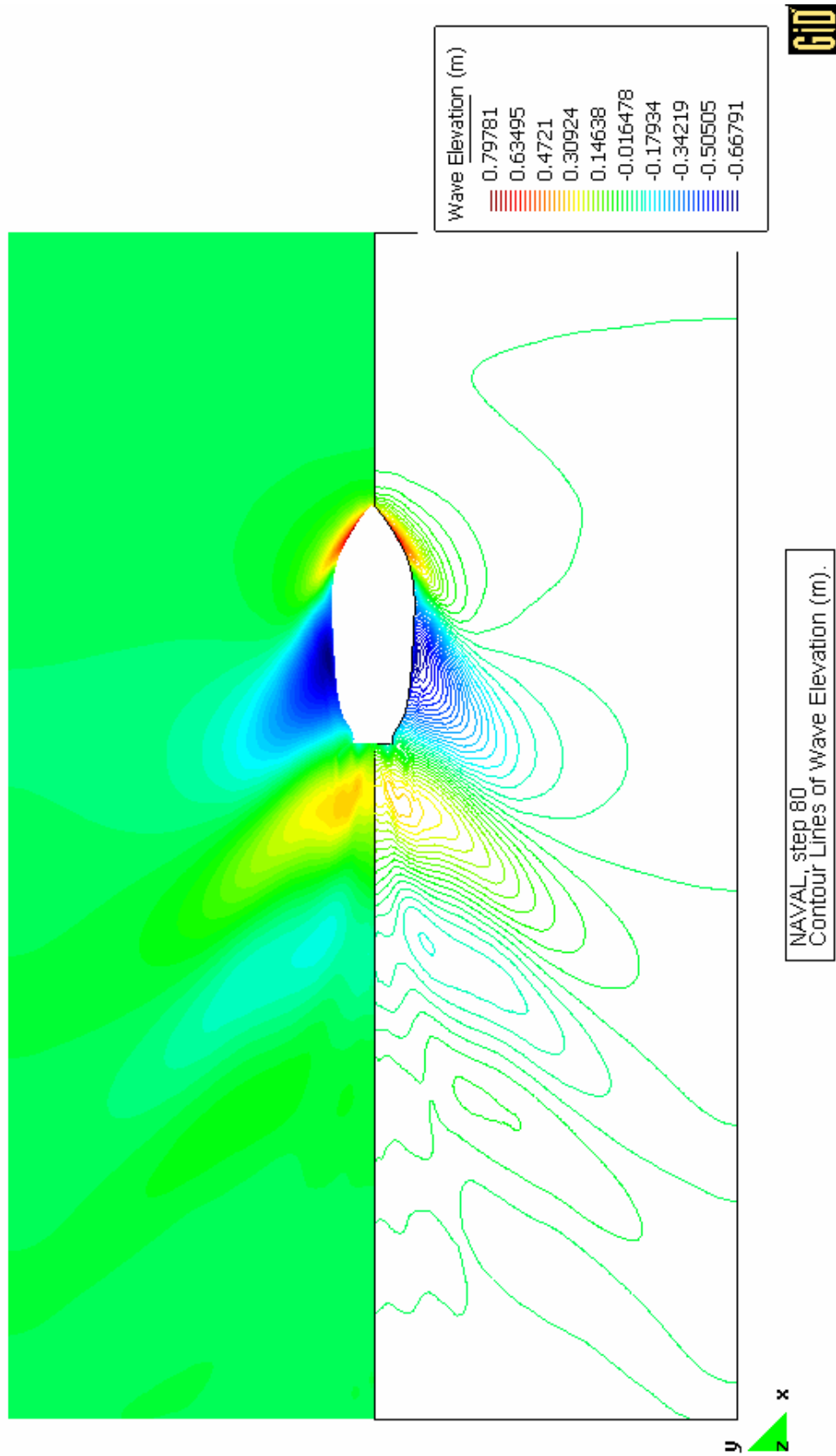


5.3.2 Distribución de presiones

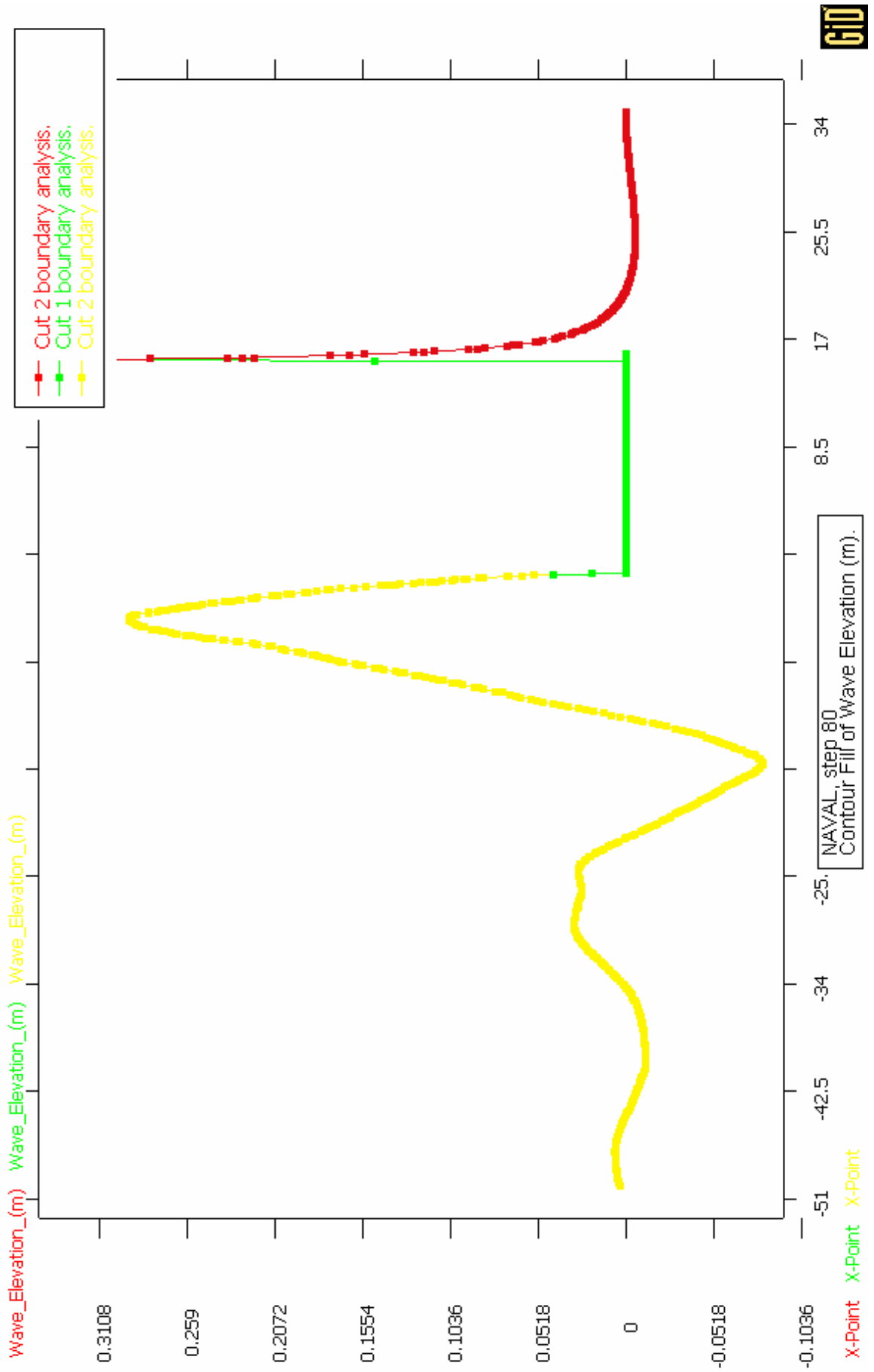




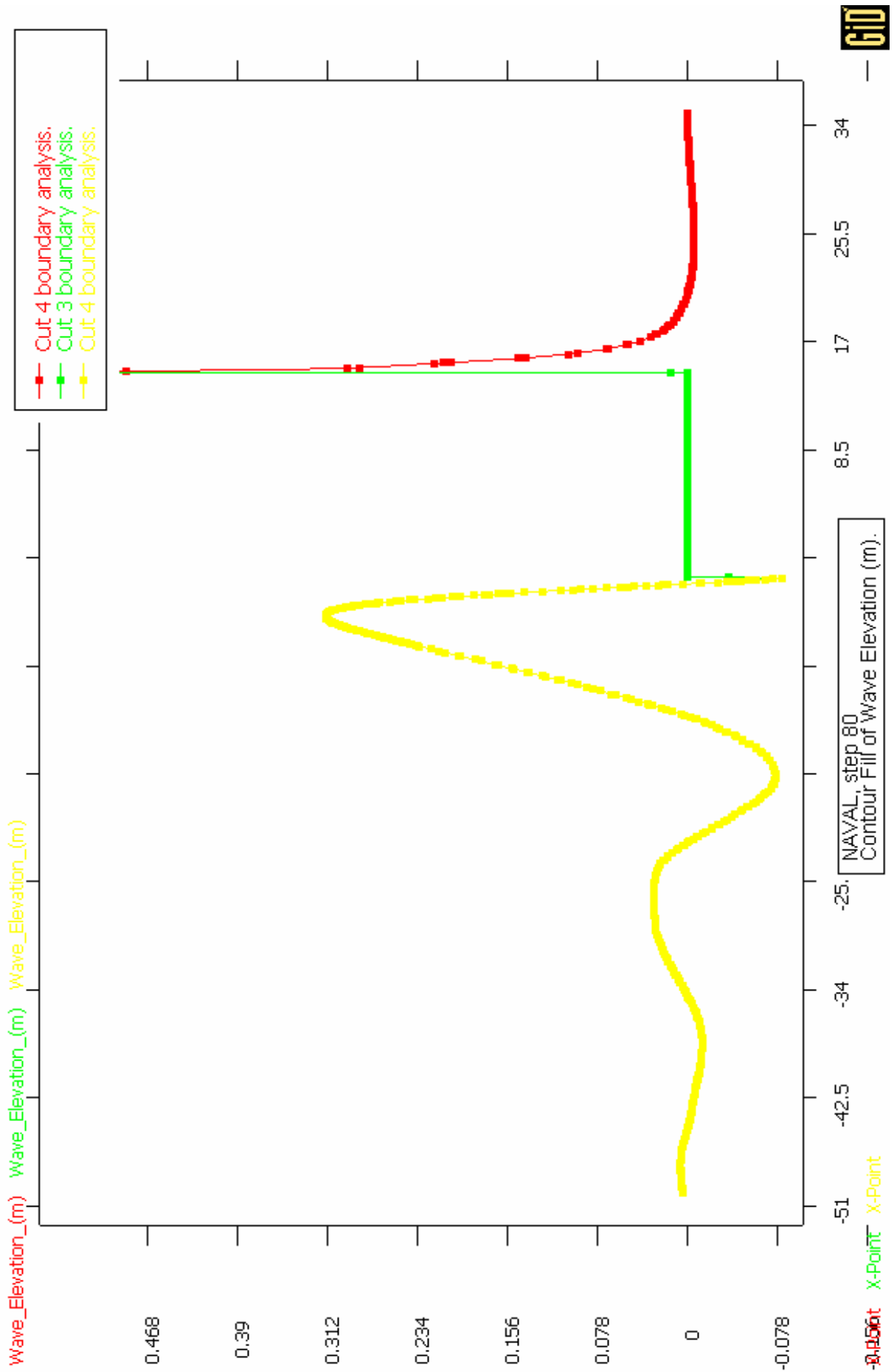
5.3.3 Mapa de olas y cortes



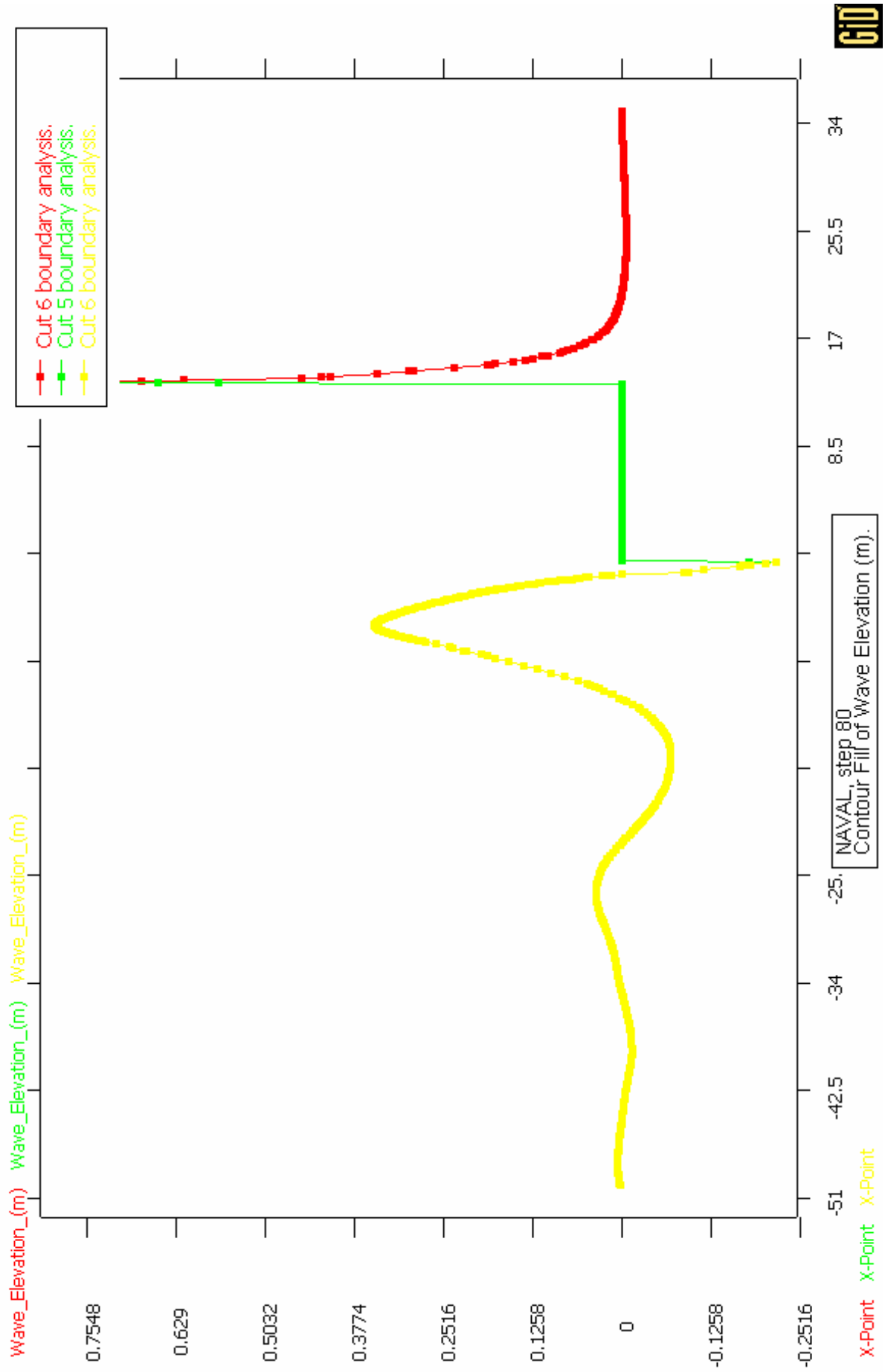
Crujía



0.25*B

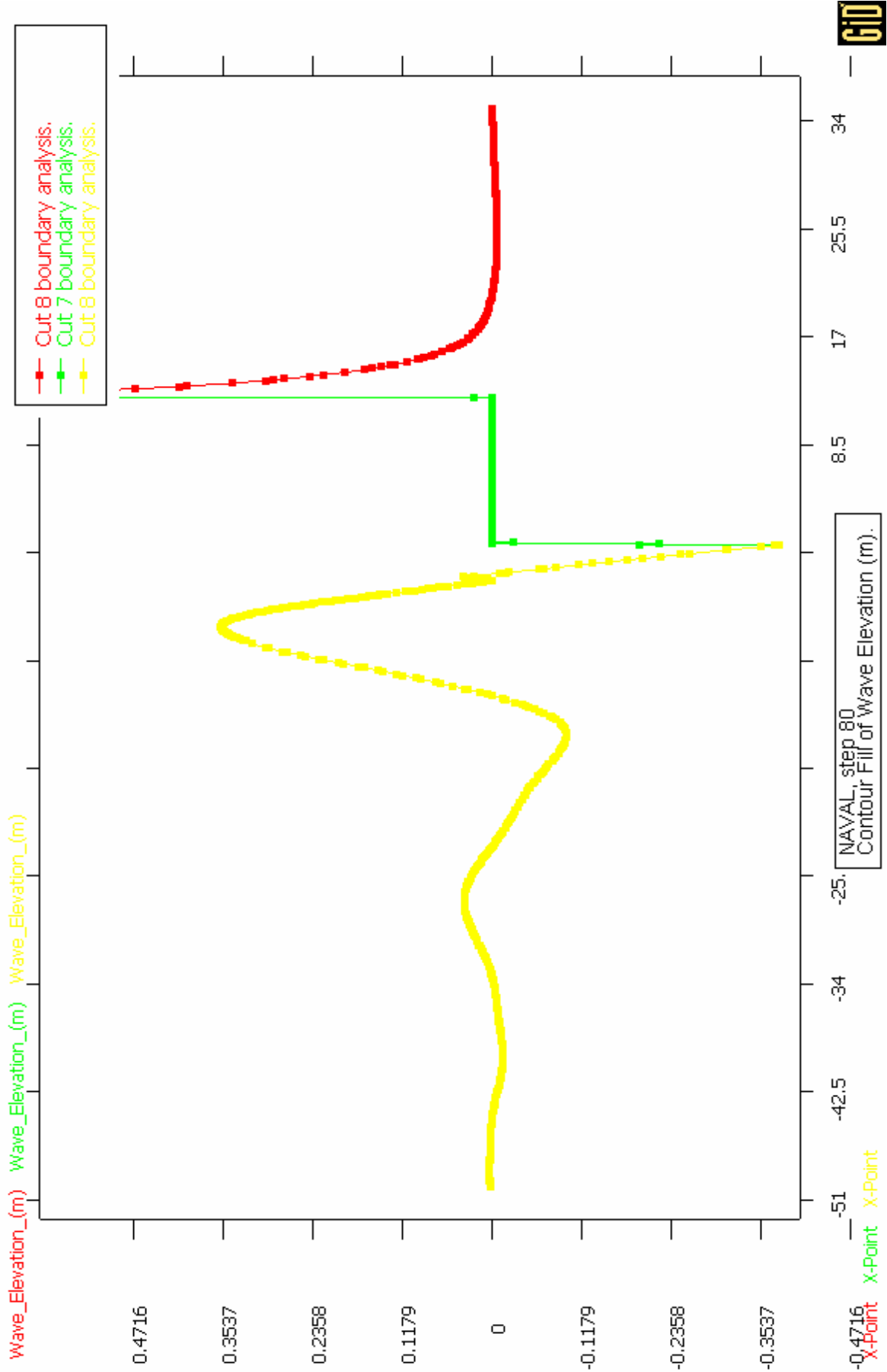


0.5*B

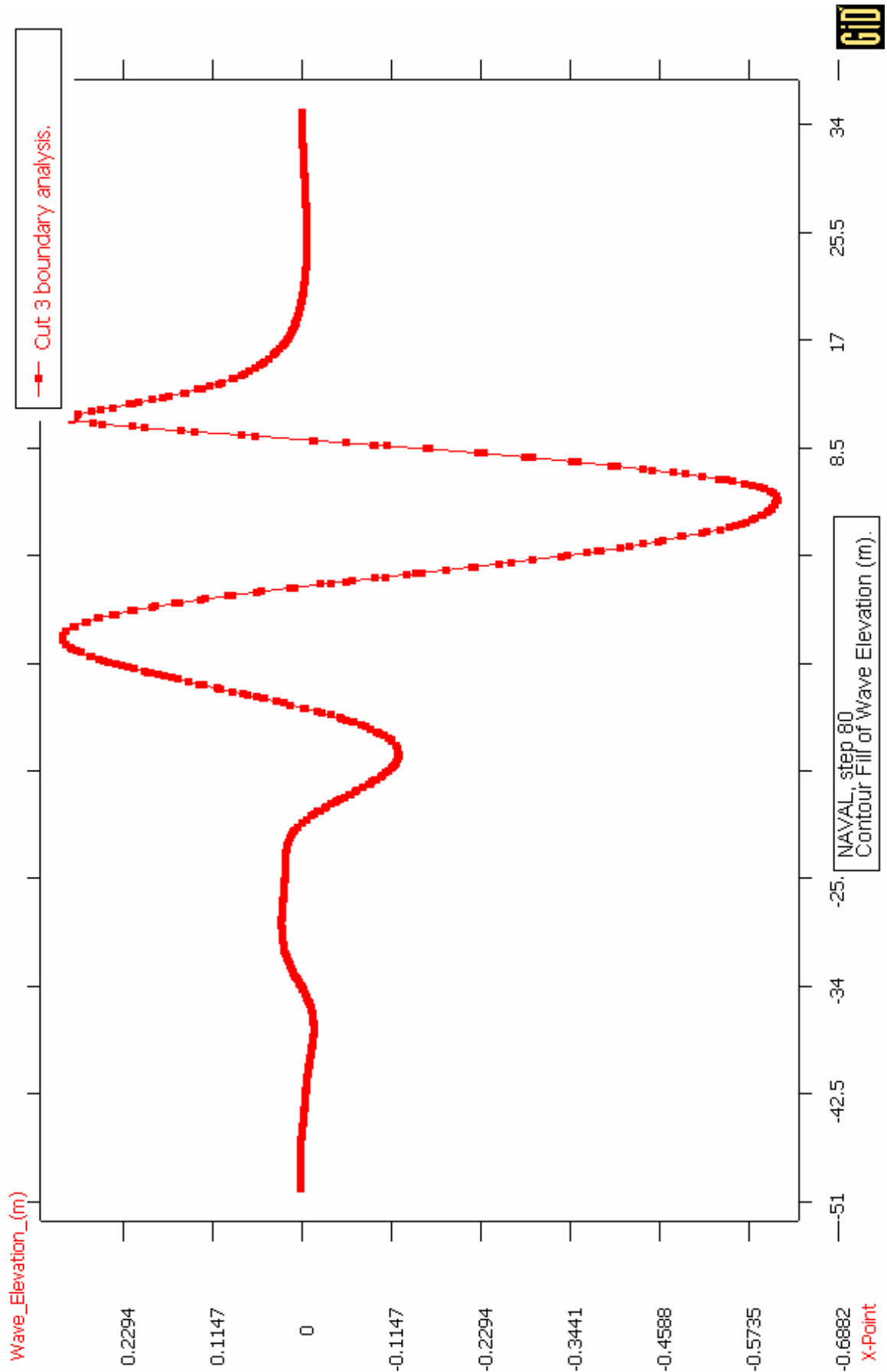


NAVAL_step 80
Contour Fill of Wave Elevation (m).

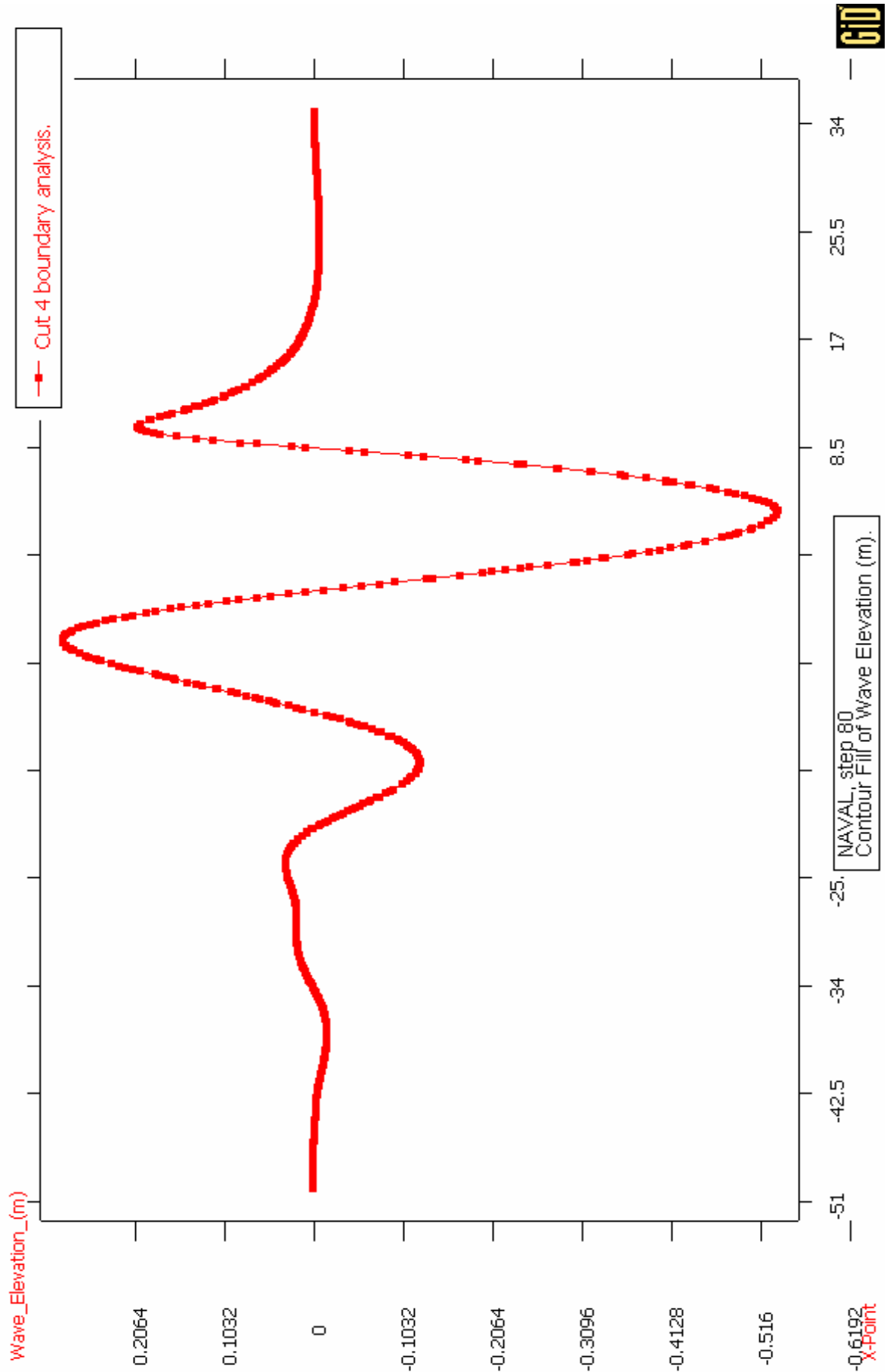
0.75*B



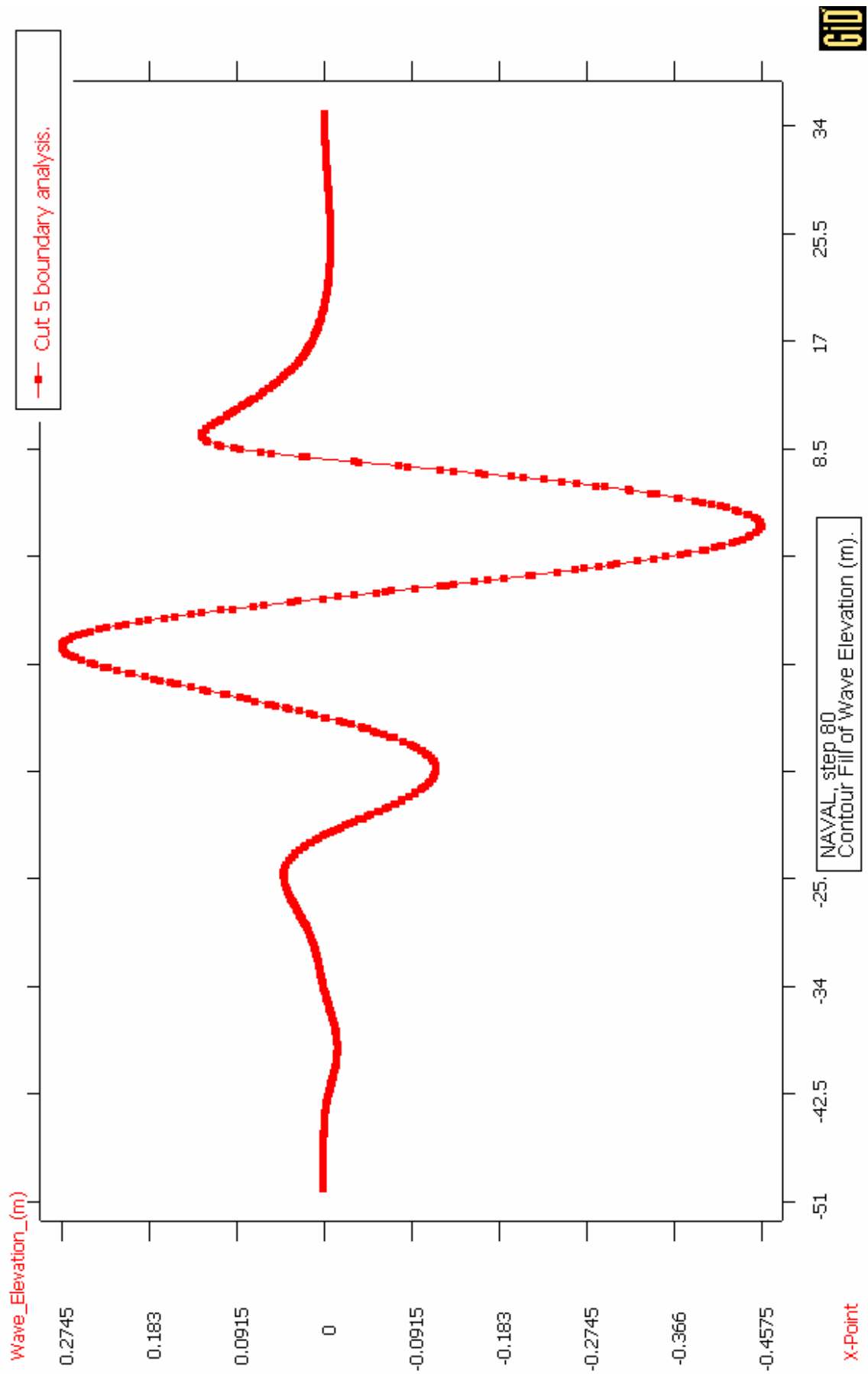
1.25*B



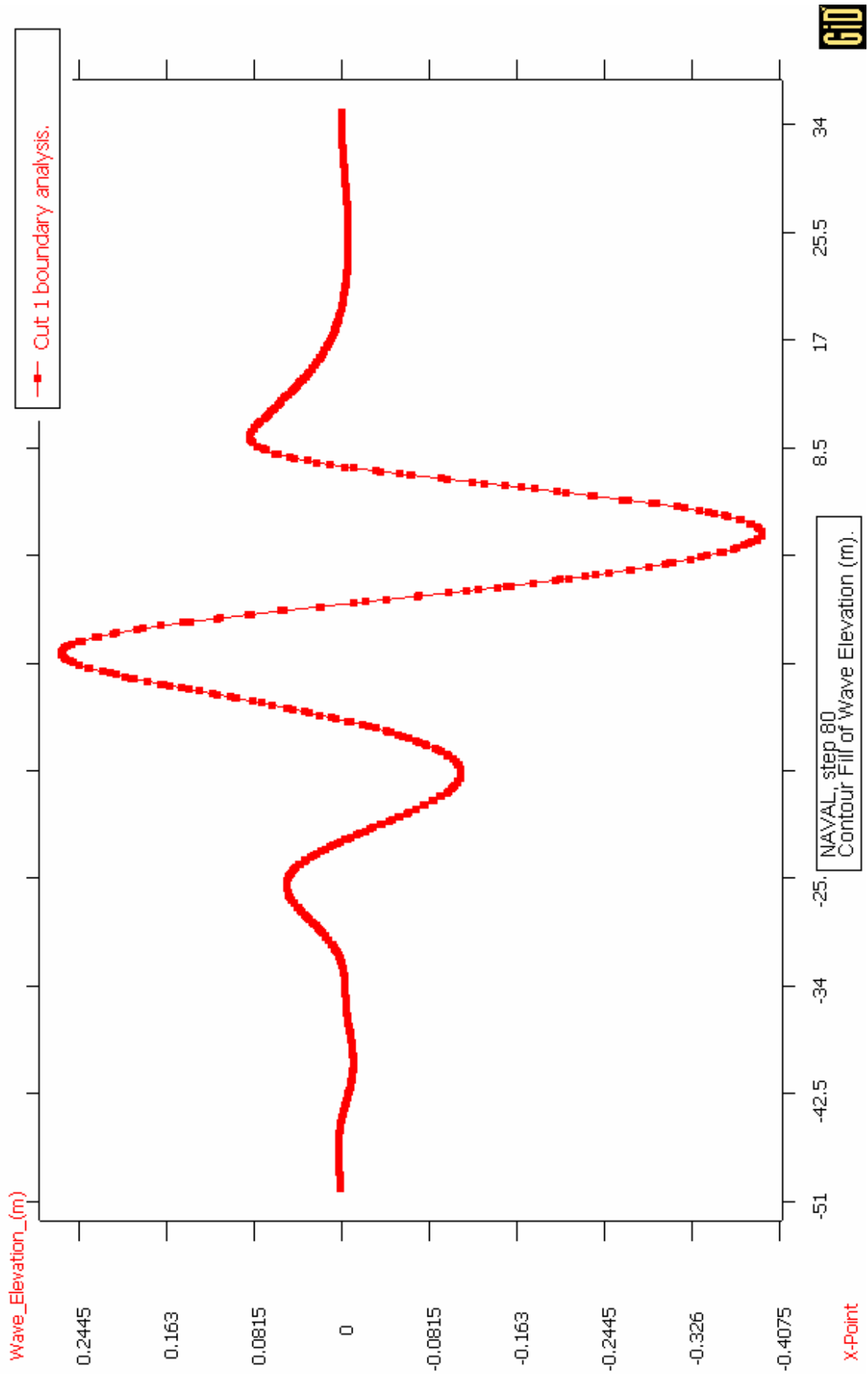
1.5*B



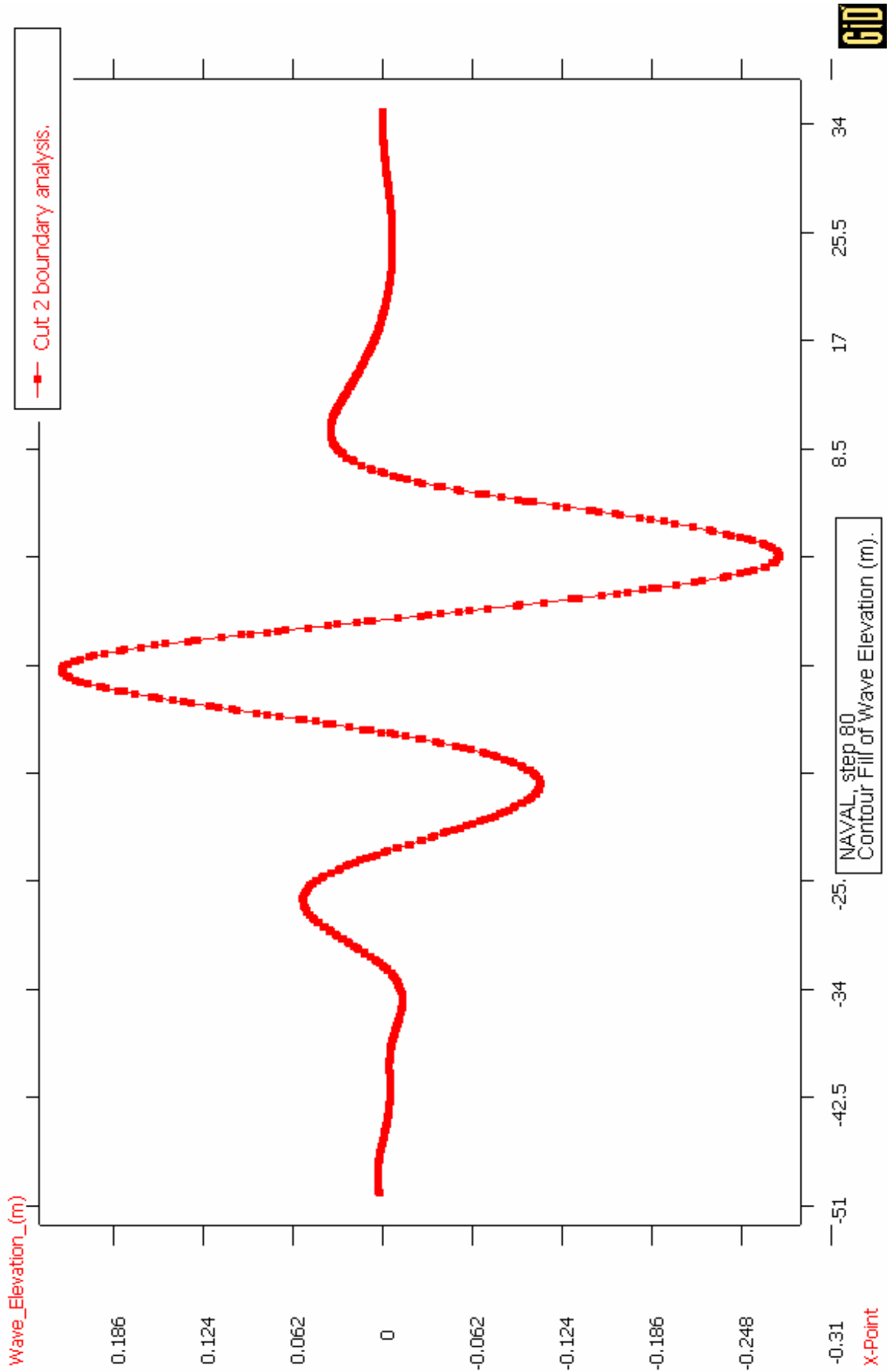
1.75*B



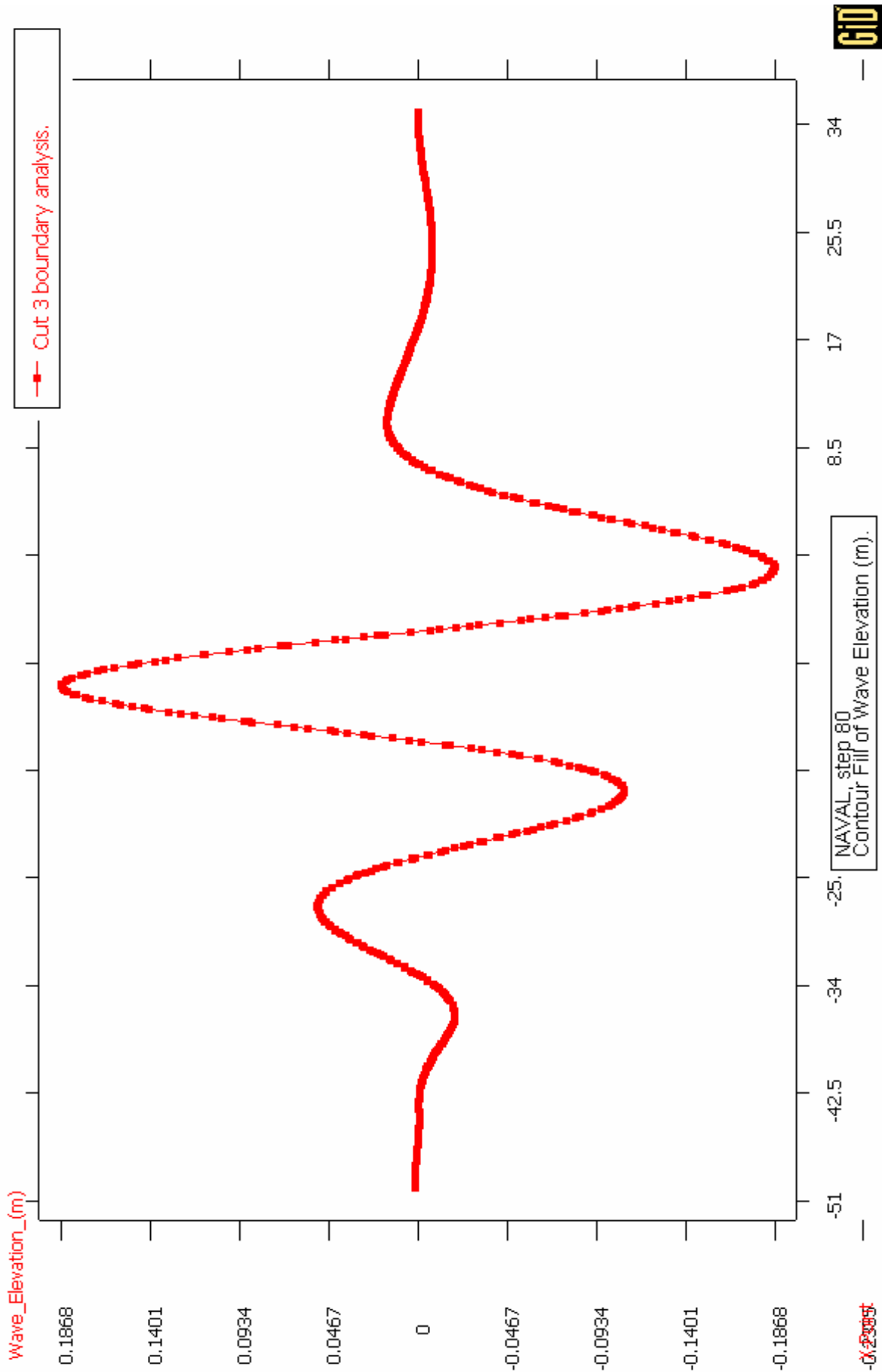
2*B



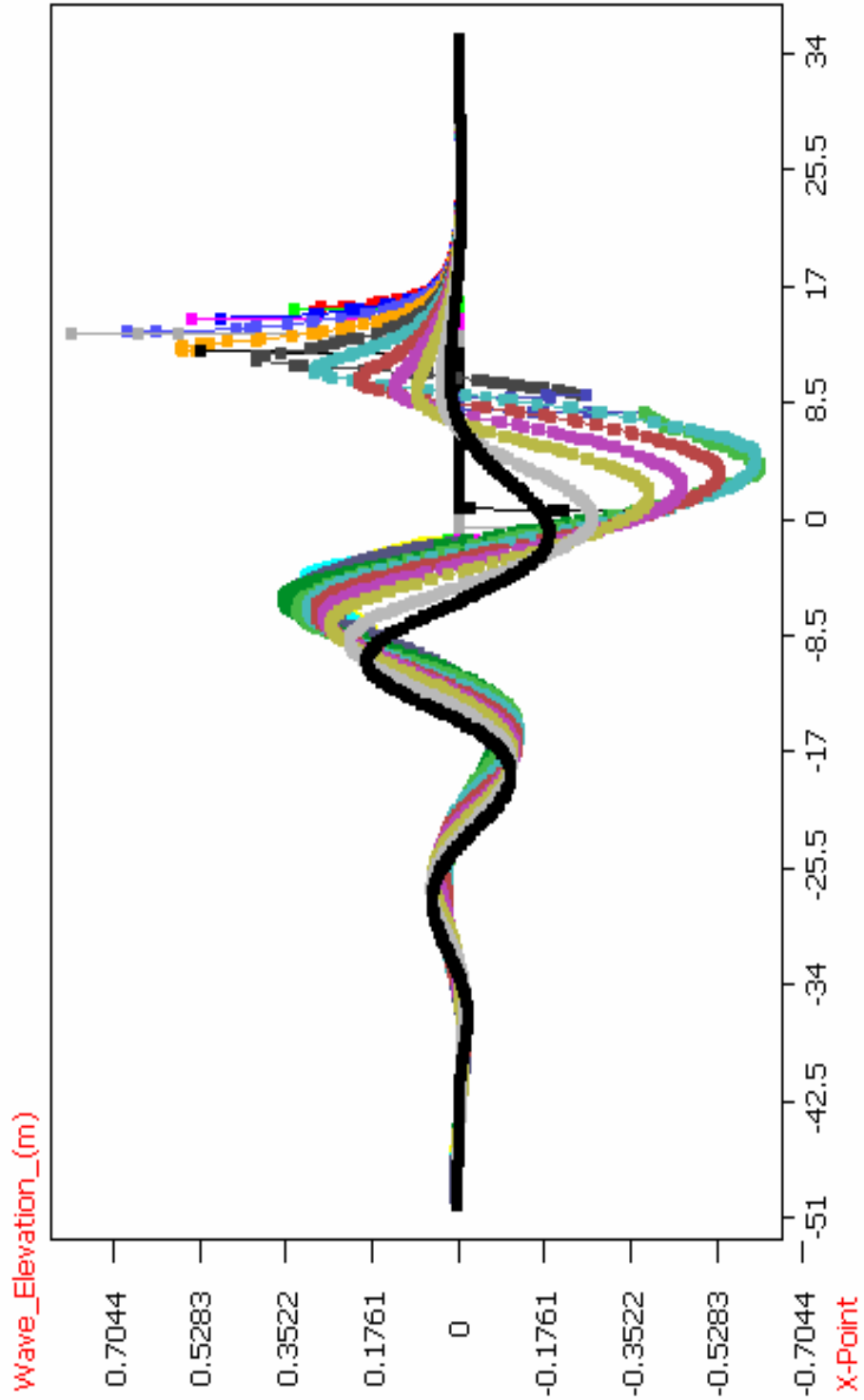
2.5*B



3*B

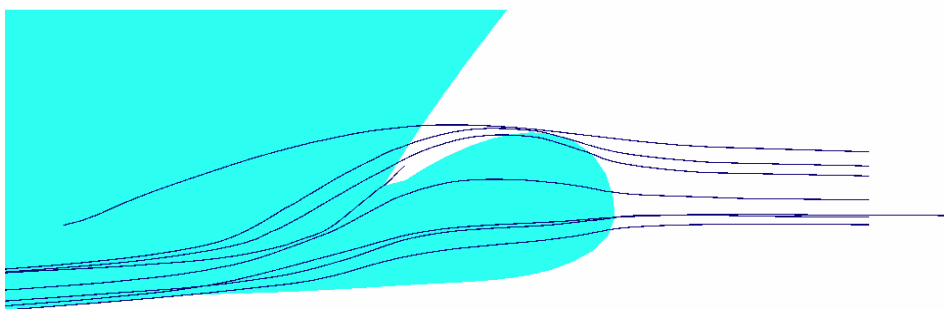
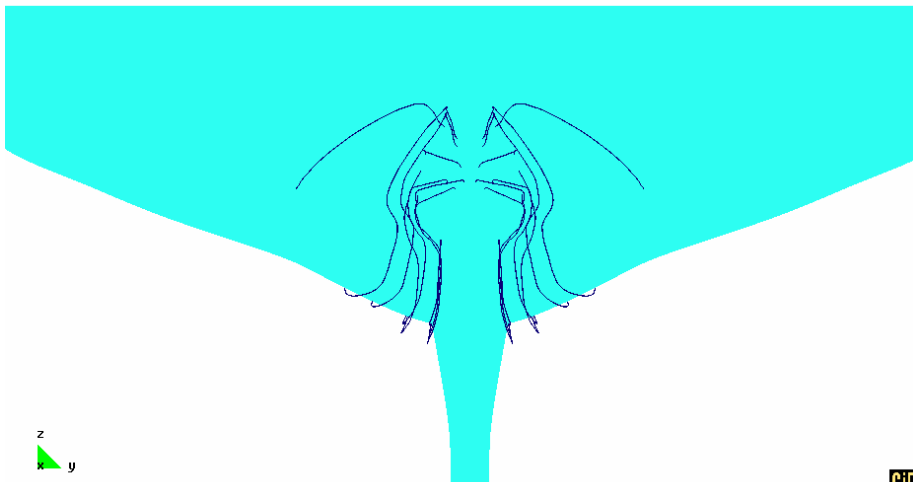
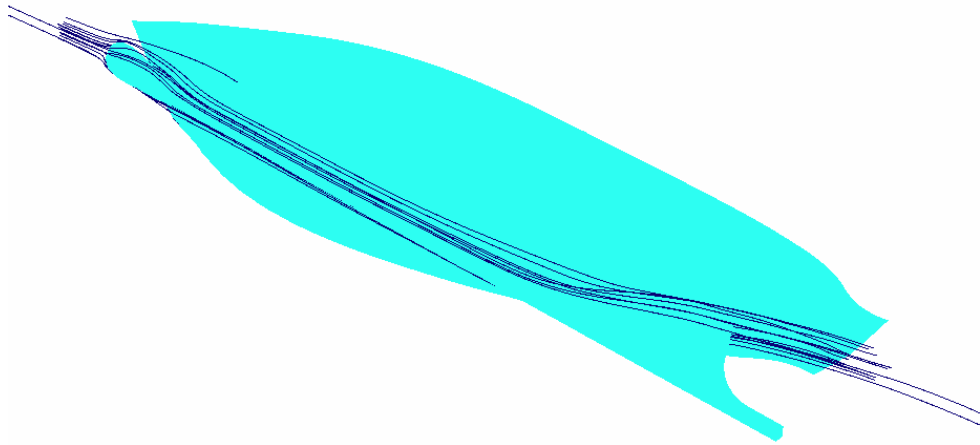


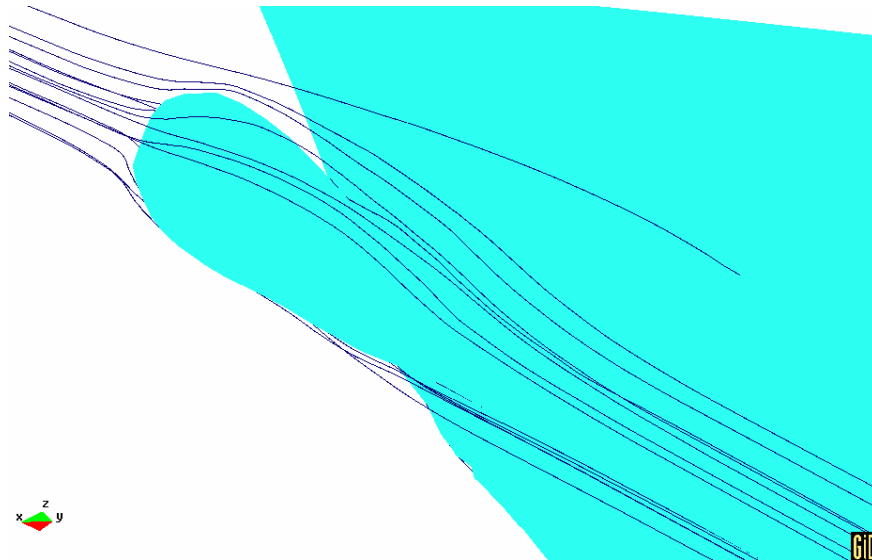
Conjunto de todos los cortes



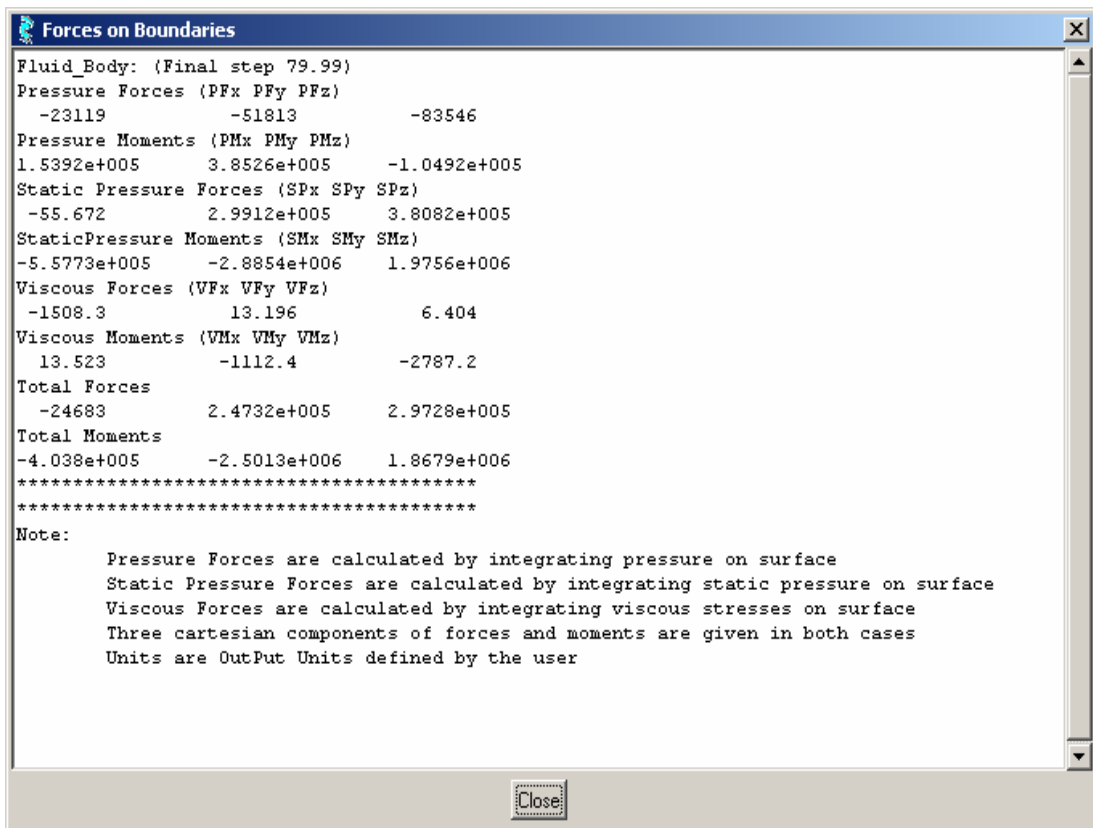
NAVAL_step 80
Contour Fill of Wave Elevation (m).

5.3.4 Distribución de líneas de corriente a lo largo del casco y detalle de algunas zonas





5.3.5 Resultados de fuerzas y momentos



6. Comentario de los resultados obtenidos

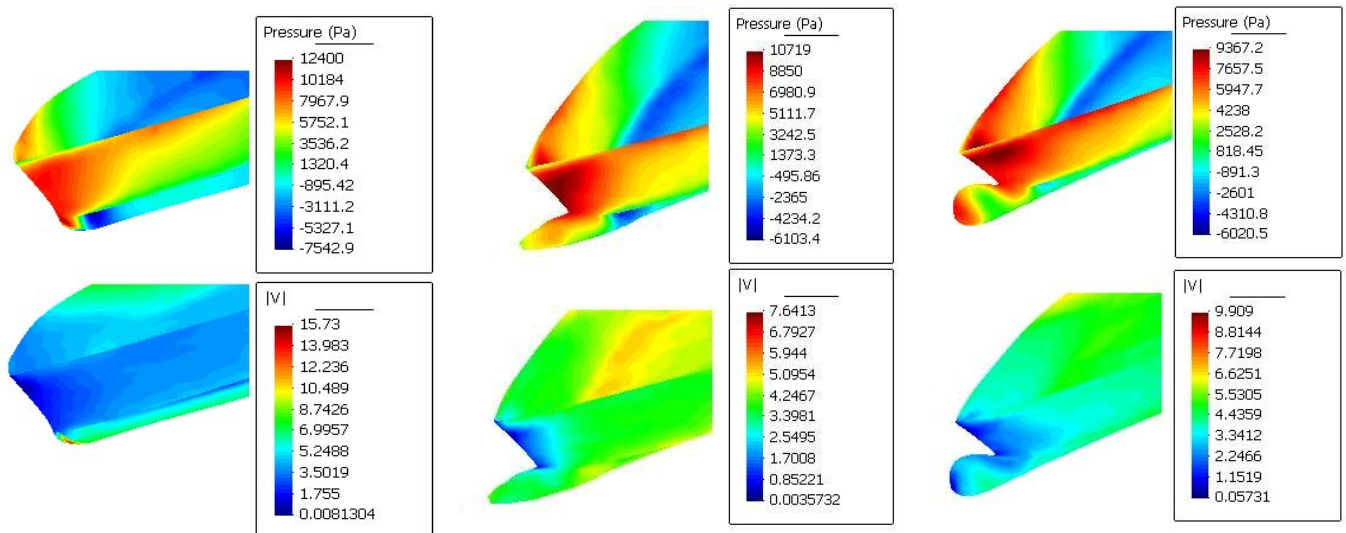
6.1 Velocidades y Presiones

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

La zona de proa es la zona en la que mejor se puede observar este fenómeno.

Analizando cualquiera de los tres modelos se observa como se cumple el teorema anteriormente citado, 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.

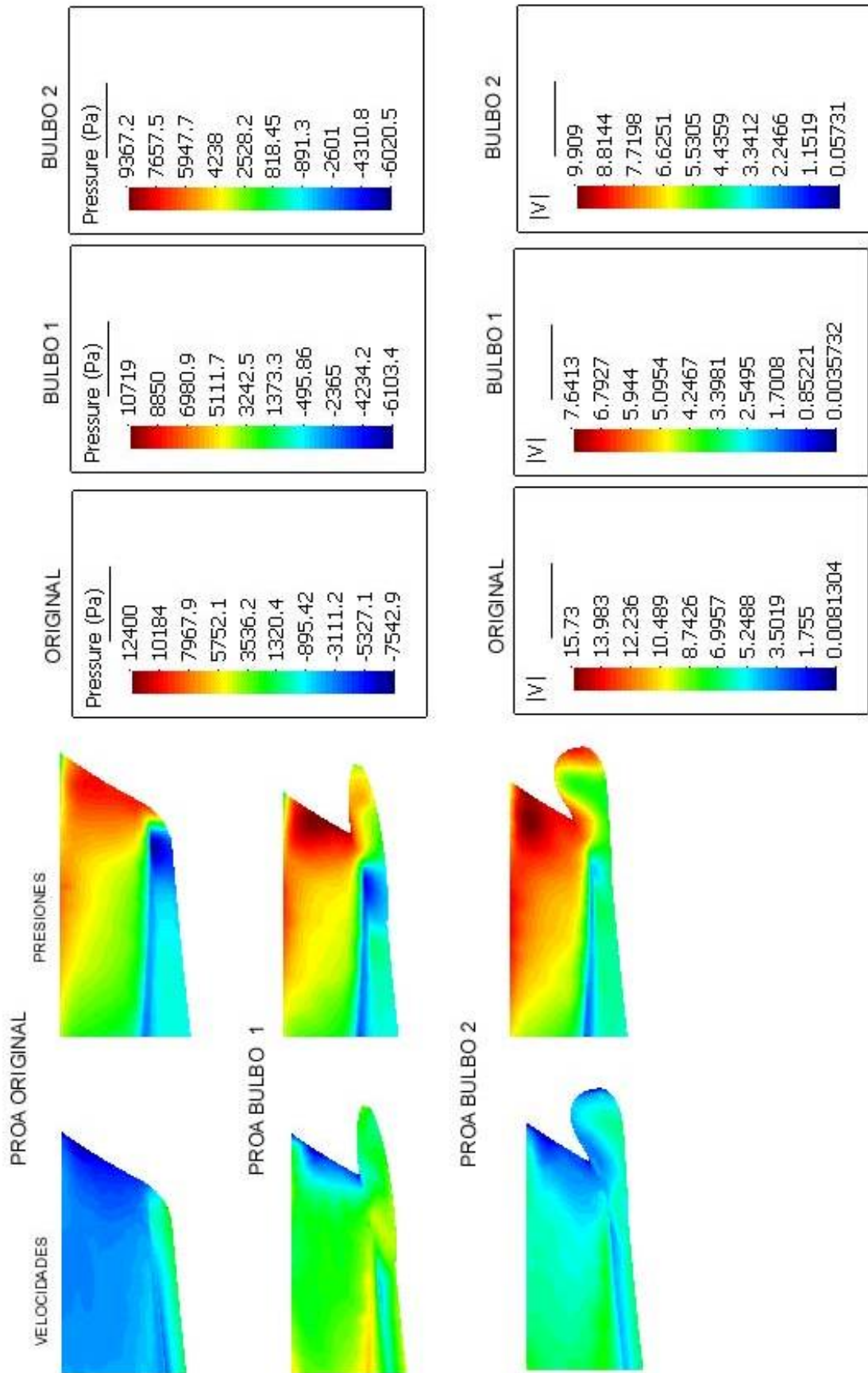
A lo largo de todo el casco se observa este mismo fenómeno reflejado por los diferentes colores de las leyendas.



ORIGINAL

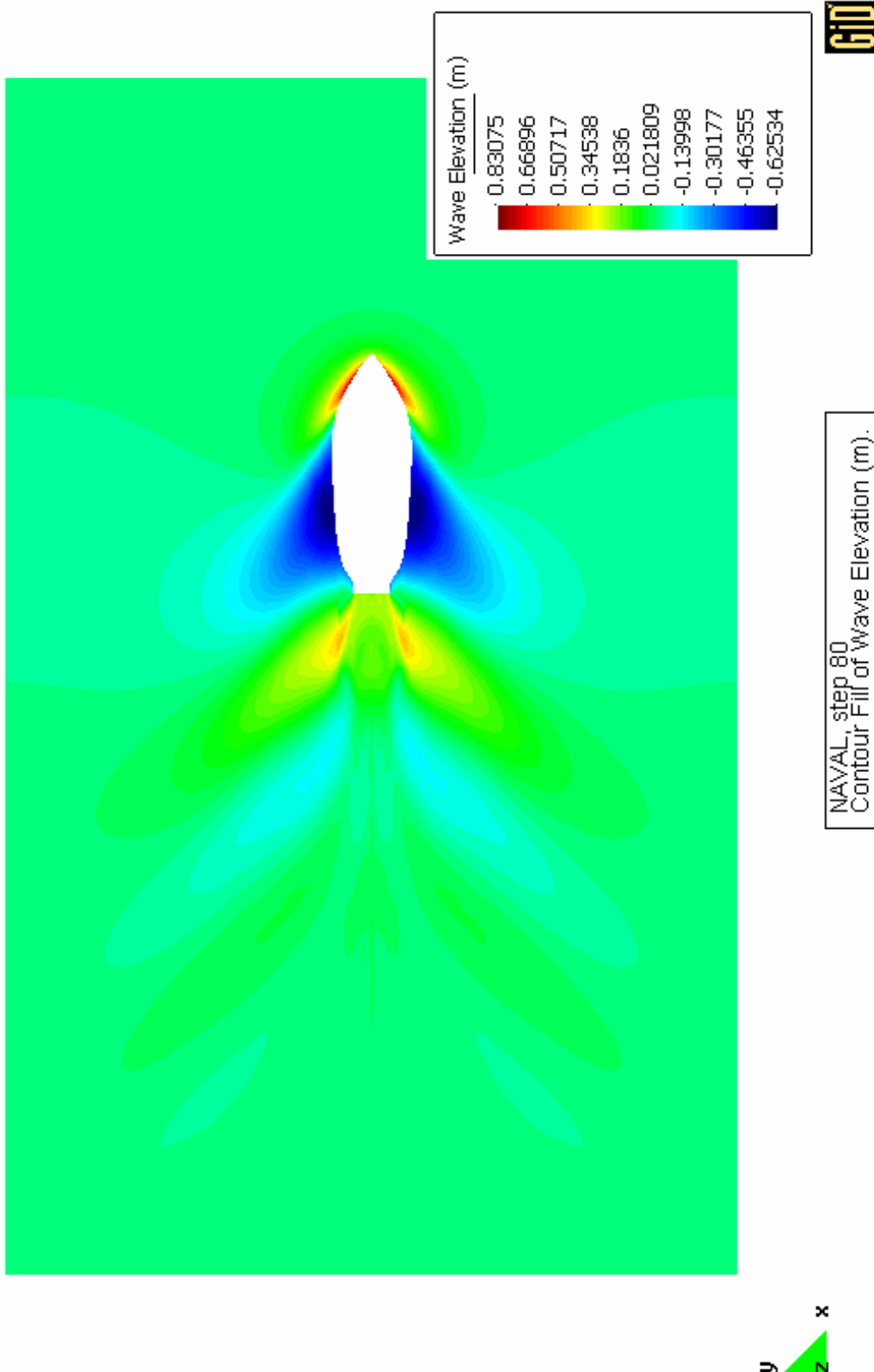
BULBO 1

BULBO 2

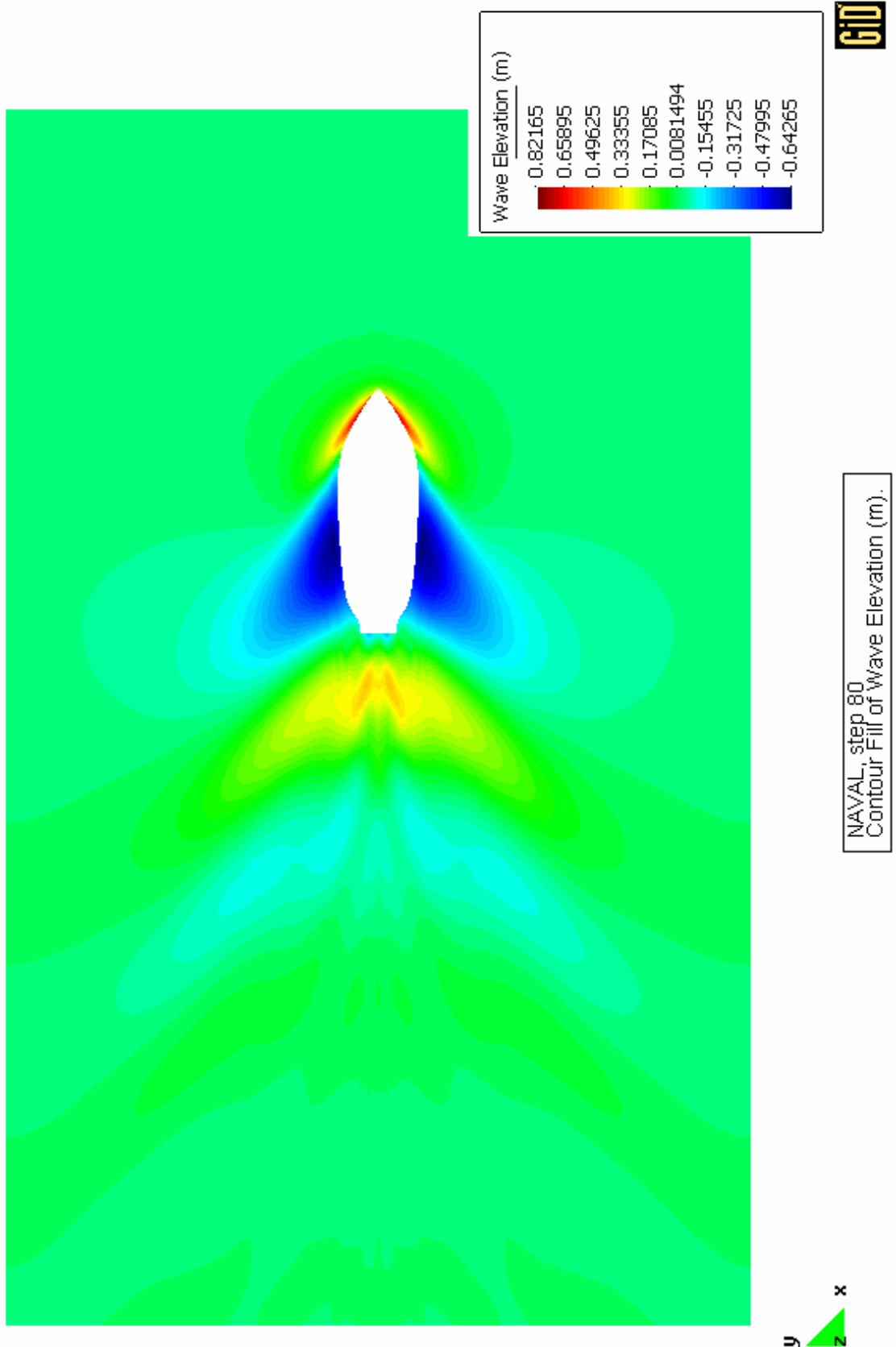


6.2 Mapa de olas y cortes con la superficie libre

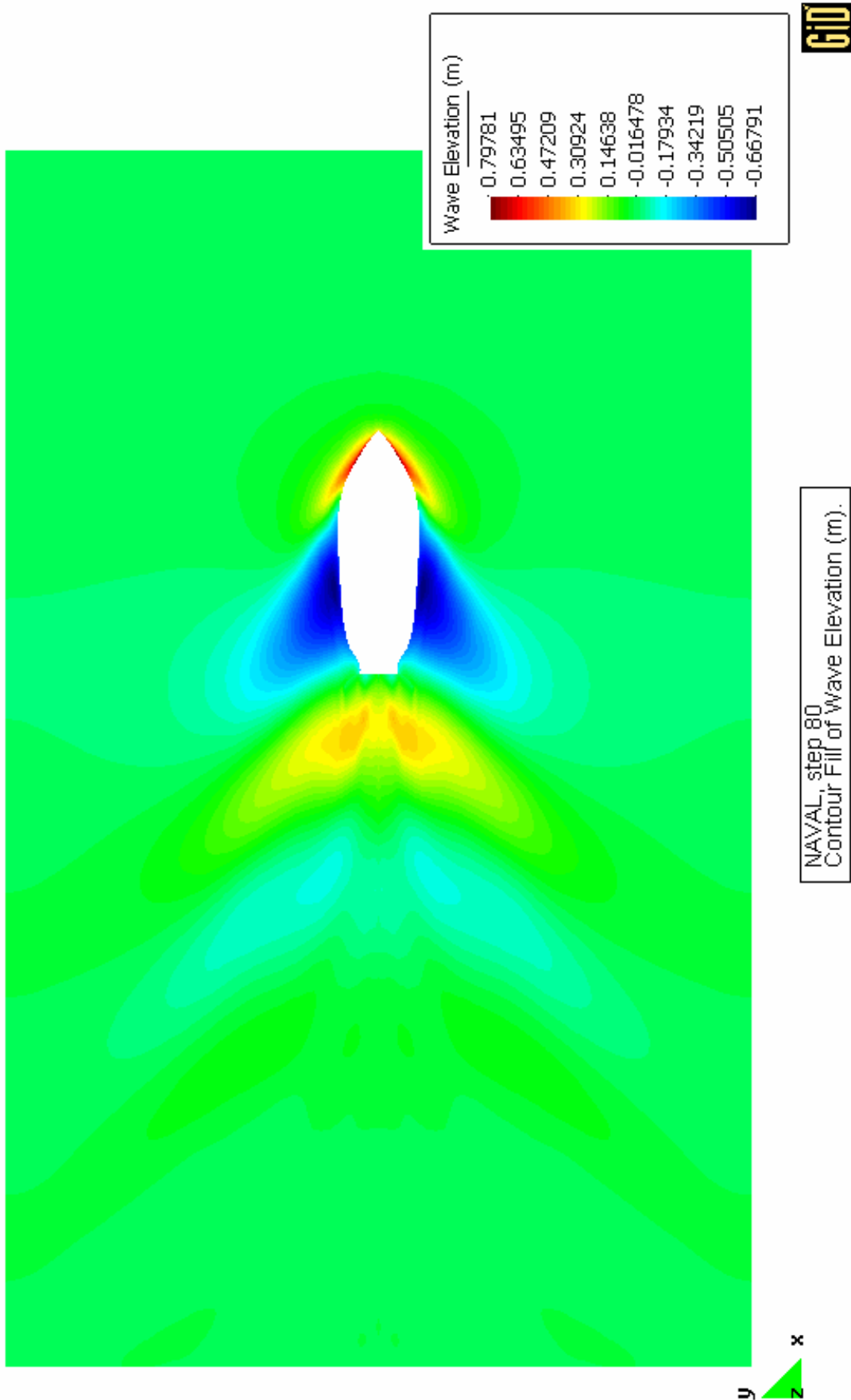
6.2.1 Mapa de olas para modelo original (escala en m)



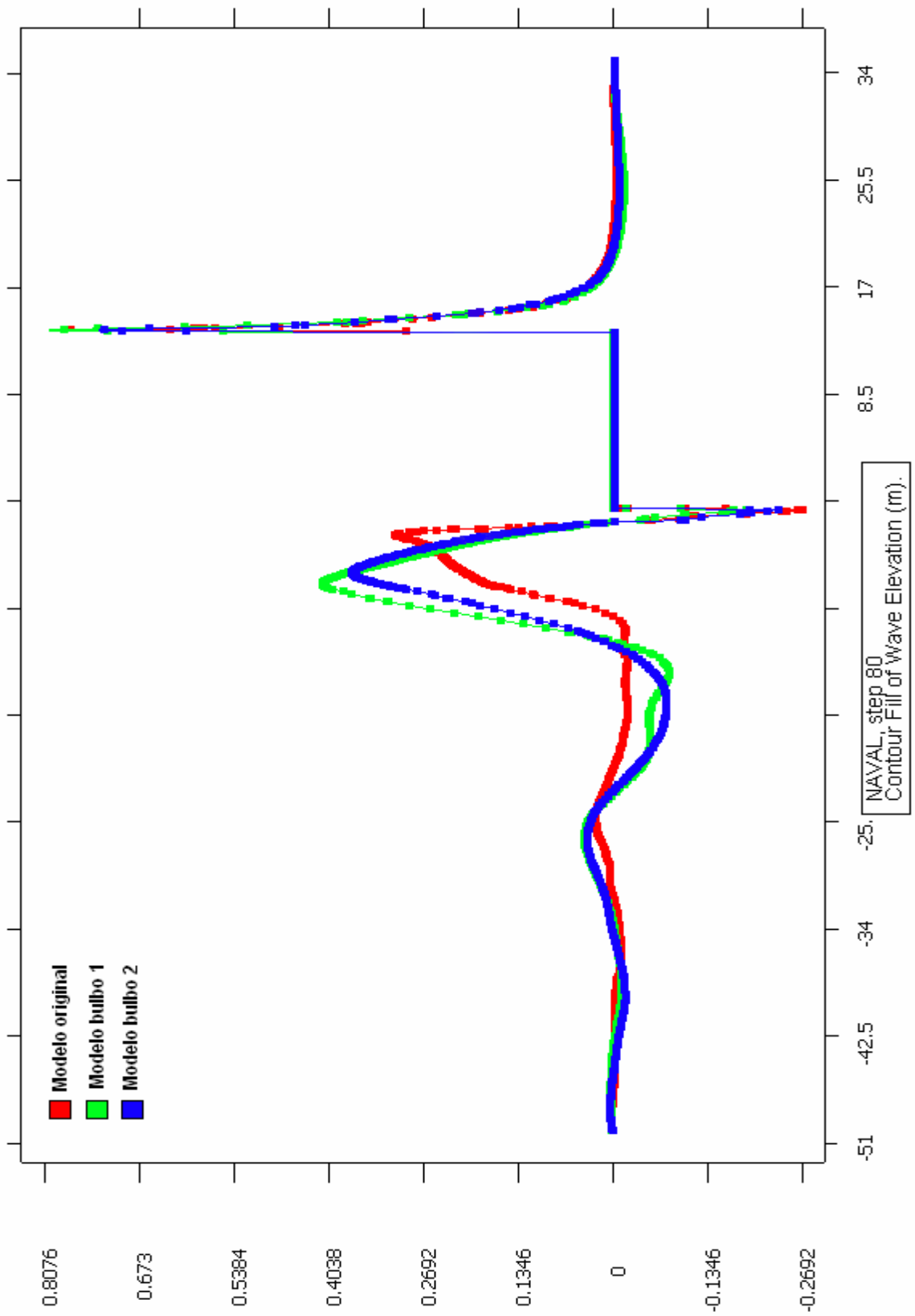
6.2.2 Mapa de olas modelo bulbo 1



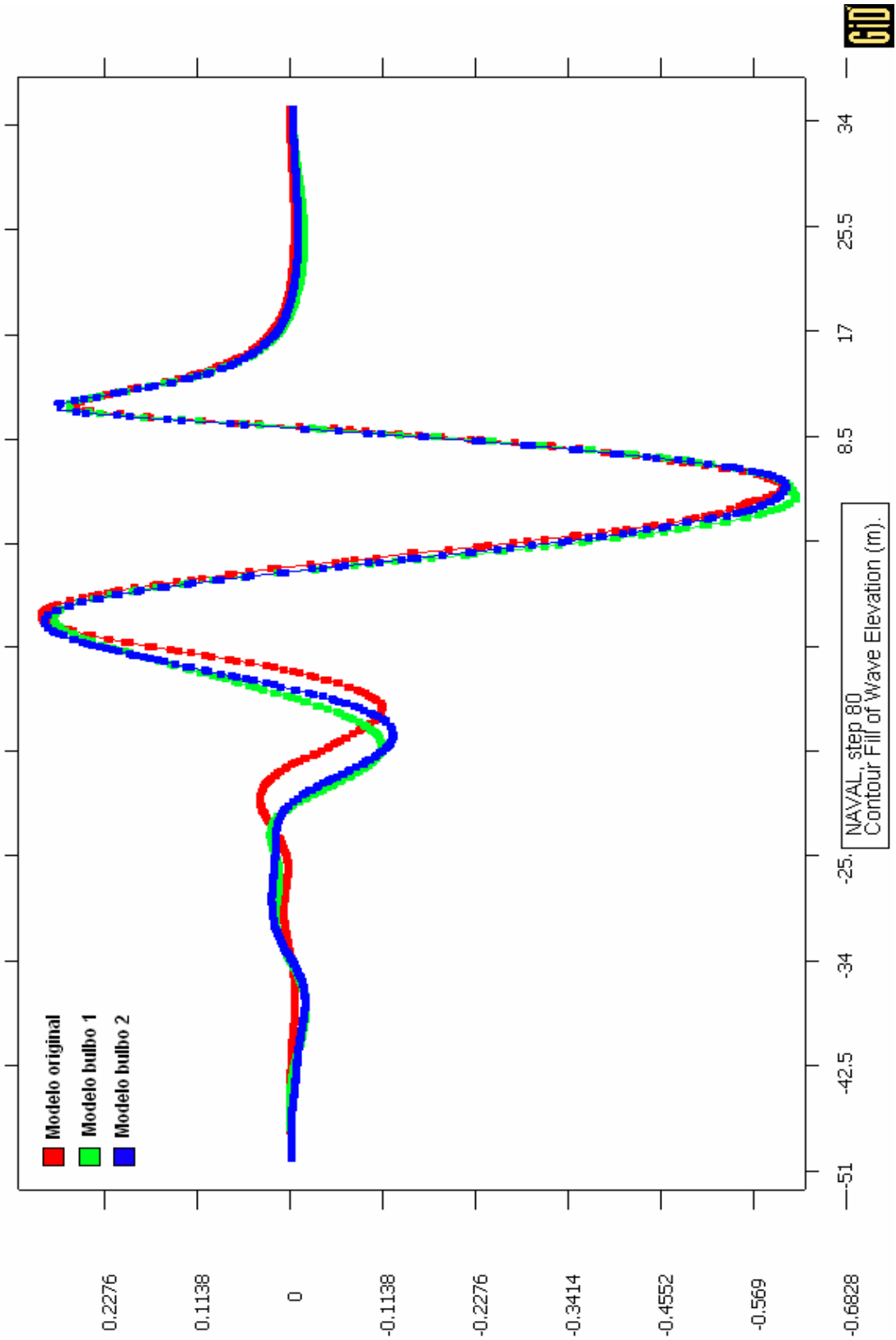
6.2.3 Mapa de olas modelo bulbo 2



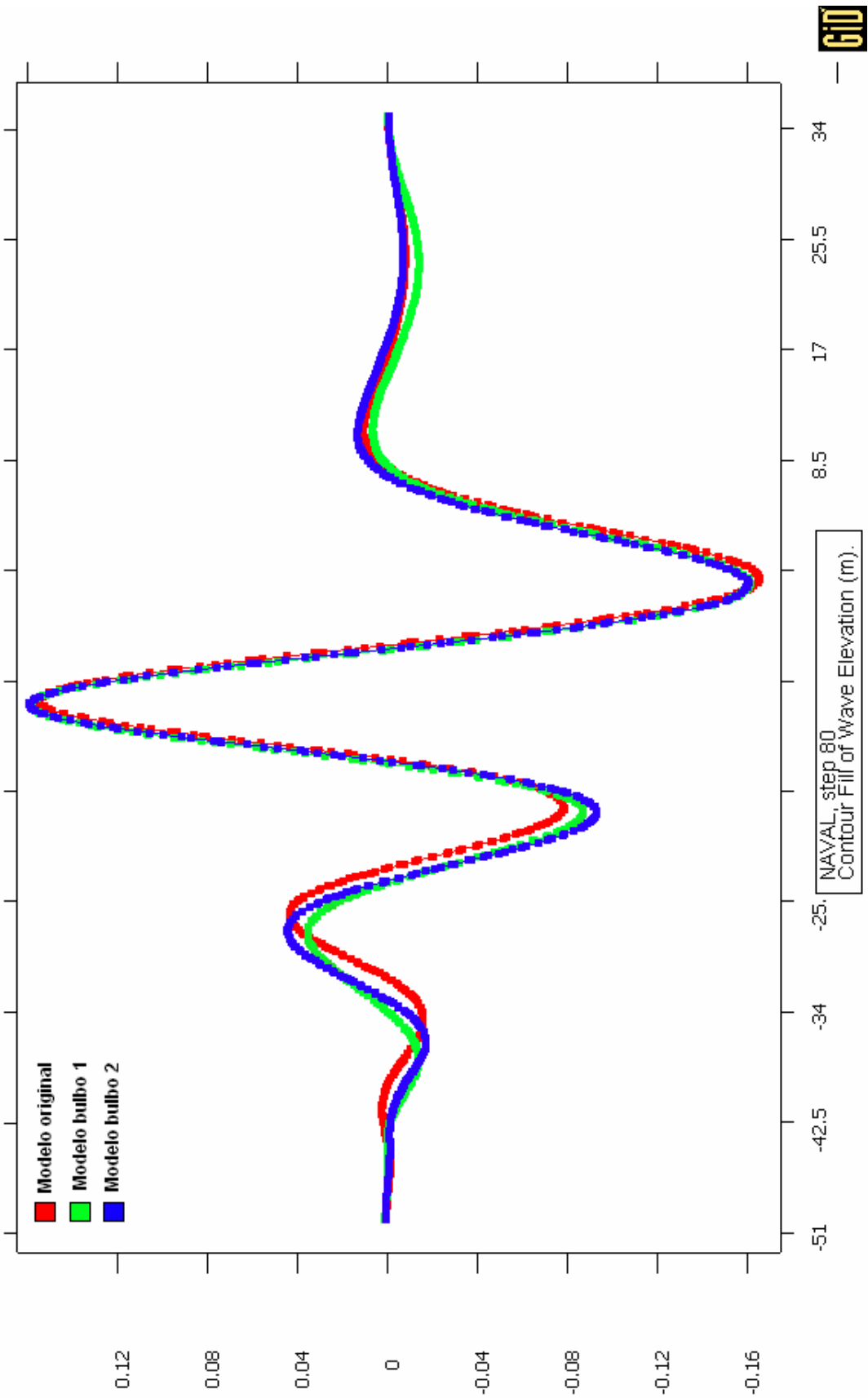
Cortes de la ola a $0.5 \cdot B$



Cortes de la ola a 1.25*B



Cortes de la ola a 3*B



CONCLUSIONES

La calidad de un programa de CFD queda demostrada a través de una validación con datos principalmente experimentales (los sacados de los canales de experiencias).

Los CFD son una herramienta en constante desarrollo y que en un futuro podrán sustituir a los canales experimentales, pero actualmente no pueden dar una respuesta exacta y completa, por lo tanto se han convertido en una herramienta de diseño muy útil en las primeras es fases del proyecto que permiten la optimización de las formas como complemento a la labor de los canales experimentales y que pueden reducir el coste en las primeras etapas del proyecto.

A la vista de los resultados obtenidos con la utilización de este CFD, puede afirmarse en primera estancia que la optimización de las formas del buque ha sido satisfactoria.

Observando los mapas y cortes de la ola con la superficie libre, se ve como las formas modificadas provocan deformaciones un tanto menores en la altura de la ola. Este fenómeno se ve claramente en el corte realizado a 0.5 de la manga en el que la altura de la ola en proa es menor en el modelo bulbo 2 que en el original. También mirando las leyendas de los mapas de olas de los tres modelos, se ve como en la leyenda del modelo bulbo 2 los valores de altura de ola son menores que en los otros.

Estos valores son del orden de un 1.095 % del modelo bulbo 1 con respecto al original y de un 3.966 % del modelo bulbo 2 con respecto al original

Analizando las distribuciones de presiones de los tres modelos se aprecia como en el modelo bulbo 2, las mayores presiones obtenidas son menores que las mayores presiones obtenidas en los otros dos, esto mismo se cumple en tanto que a términos de velocidad se refiere, teniendo presente la aplicación del teorema de Bernoulli.

Analizando los datos obtenidos a partir del procesador de resultados de Tdyn, se observa que la optimización en realidad no ha sido del todo satisfactoria, ya que al analizar las fuerzas totales en la dirección del eje X, se ve que en el modelo original son menores que en los otros dos casos. Esto se comprueba mirando en el apartado: Resultados de fuerzas y momentos de cada modelo.

Dentro de Total Forces se ven las fuerzas correspondientes a las tres coordenadas:

- Coordenada X: corresponde a la resistencia al avance.
- Coordenada Y: se contrarresta con la otra mitad del modelo, su resultado final es cero.
- Coordenada Z: corresponde al empuje y se contrarresta con el peso del barco, su resultado final es cero.

Viendo esto, se podría optar por dejar el barco con su forma original, ensayar otro tipo de bulbo, o ensayar el modelo en un canal y comprobar si los datos obtenidos del CFD son similares a los obtenidos en el ensayo.

BIBLIOGRAFIA

- Métodos matemáticos en Hidrodinámica. Luís Pérez Rojas
- COMPASS INGENIARÍA Y SISTEMAS, Reference Manual Tdyn. Tdyn, Barcelona 2002.
- COMPASS INGENIARÍA Y SISTEMAS, Tutorial 2D Tdyn. Tdyn, Barcelona 2002.
- COMPASS INGENIARÍA Y SISTEMAS, Tutorial 3D Tdyn. Tdyn, Barcelona 2002.
- COMPASS INGENIARÍA Y SISTEMAS, Tdyn Theoretical Background.
- Bermejo, R; Pérez Rojas L.; Sánchez, JM.; Souto, A. y Zamora, R., Revista "Ingeniería Naval" nº 691, Febrero 1993; nº 693, Abril 1993.

Páginas Web de interés:

- <http://www.compassis.com> (Página del programa Tdyn)
- <http://canal.etsin.upm.es/articulos.htm>