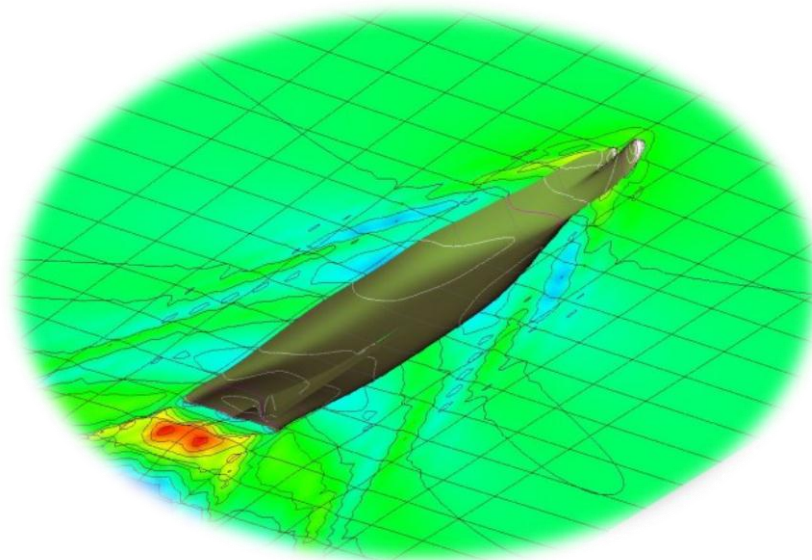




ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA CARENA DE UN CATAMARÁN MEDIANTE CFD

Septiembre 2012
Universidad Politécnica de Cartagena
Juan Antonio Martín Berenguel
Francisco Blasco Lloret



1.INTRODUCCIÓN	1
2. MECÁNICA DE FLUIDOS	3
2.1. DEFINICIÓN DE FLUIDO	3
2.2. PROPIEDADES DE FLUIDOS.....	4
2.2.1. Masa específica, peso específico y densidad	5
2.2.2. Viscosidad.....	5
2.2.3. Viscosidad cinemática	6
2.2.4. Compresibilidad	6
2.2.5. Presión de vapor	6
2.2.6. Fuerzas y presión.....	7
2.2.7. Valores típicos de las propiedades de fluidos más usuales	8
2.3. TIPOS DE FLUIDOS	9
2.4. FLUJO DE FLUIDOS.....	10
2.4.1. Estacionario o no estacionario	10
2.4.2. Permanente o no permanente.....	10
2.4.3. Uniforme o no uniforme	10
2.4.4. Flujo laminar y turbulento. El número de Reynolds.....	11
2.4.5. Rotacional o irrotacional	11
2.4.6. Flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales	12
2.5. ASPECTOS TEÓRICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS.....	12
2.5.1. Ecuación conservación de la masa	12
2.5.2. Concepto de capa límite.....	13
2.5.3. Ecuación de Bernoulli.....	14
2.5.4. Ecuaciones de Navier – Stokes	15
3. CFD'S.....	16
3.1. HISTORIA DE LOS CFD's	16
3.2. CLASIFICACIÓN DE METODOS CFD's	19
3.3. LOS CAMPOS HIDRODINÁMICOS DE LOS CFD's	21
3.4. VALIDACIÓN DE CFD's.....	23
4. TDYN.....	25
4.1. PRE-PROCESO.....	26

4.1.1. CREACIÓN DE GEOMETRÍA.....	27
4.1.2. CONDICIONES.....	28
4.1.2.1 FIJAR PRESIÓN (FIX PRESSURE)	29
4.1.2.2 FIJAR VELOCIDAD (FIX VELOCITY).....	29
4.1.2.3 FIJAR VECTOR VELOCIDAD (FIX VELOCITY COMPONENT)	29
4.1.2.4 FIJAR LA DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD (FIX VELOCITY DIRECTION)	29
4.1.2.5 QUITAR CONDICIONES DE LA PRESIÓN (REMOVE VELOCITY CONDITION)	29
4.1.2.6 QUITAR CONDICIONES DE LA VELOCIDAD (REMOVE VELOCITY CONDITION) ...	30
4.1.2.7 CAMPO DE PRESIONES (PRESSURE FIELD)	30
4.1.2.8 CAMPO DE VELOCIDAD (VELOCITY FIELD)	30
4.1.2.9 FIJAR TURBULENCIA (FIX TURBULENCE)	30
4.1.2.10 CONDICIONES DE SUPERFICIE LIBRE EN “ODDLS”	30
4.1.2.11 CONDICIONES DE SUPERFICIE LIBRE EN “TRANSPIRATION”	31
4.1.3. MATERIALES	31
4.1.3.1 MATERIAL DEL FLUIDO (FLUID MATERIAL)	32
4.1.3.2 CUERPO FLUIDO (FLUID BODY)	33
4.1.4 LÍMITES (BOUNDARIES).....	34
4.1.5. DATOS DEL PROBLEMA (PROBLEM DATA)	35
4.1.6 GENERACIÓN DE LA MALLA (MESH GENERATION)	36
4.3. CÁLCULO (CALCULATE)	37
4.4. POST-PROCESO (POST PROCESSING)	37
5. VIABILIDAD DE CASO PRÁCTICO.....	39
5.1. IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA	40
5.2. CREACIÓN DEL VOLUMEN DE CONTROL	41
5.3. MATERIALES.....	44
5.4. LÍMITES.....	45
5.5. CONDICIONES DE CONTORNO.....	47
5.6. DATOS INICIALES	48
5.7. MÓDULO DE DATOS	50
5.8. DATOS DEL PROBLEMA.....	52
5.9. GENERACIÓN DE MALLA	55

5.10. CÁLCULO	56
5.11. POST-PROCESO.....	56
6. VISUALIZACIÓN Y COMENTARIO DE RESULTADOS	57
• <i>5 Nudos</i>	58
• <i>10 Nudos</i>	63
• <i>15 Nudos</i>	67
• <i>20 Nudos</i>	71
• <i>30 Nudos</i>	75
• <i>40 Nudos</i>	80
7. CONCLUSIONES.....	87
8. BIBLIOGRAFÍA.....	89
9. PÁGINAS WEB DE INTERÉS	90

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Fuerzas de superficie.....	7
Figura 2: Valores de propiedades de fluidos.....	8
Figura 3: Tipos de flujo.....	9
Figura 4: Evolución capa límite.....	13
Figura 5: Capa límite y turbulenta a lo largo de una placa lisa.....	14
Figura 6: Pasos a seguir en análisis de un problema.....	26
Figura 7: Selección tipo de simulación.....	27
Figura 8 Selección de condiciones.....	28
Figura 9: Selección materiales.....	31
Figura 10: Selección de límites.....	34
Figura 11: Datos de problema.....	36
Figura 12: Icono generar malla.....	36
Figura 13: Icono lanzar cálculo.....	37
Figura 14: Icono visualización de evolución de proyecto.....	37
Figura 15: Iconos visualización resultados.....	38
Figura 16: Casco original Rhinoceros.....	40
Figura 17: Visualización de volumen de control normal.....	42
Figura 18: Visualización de volumen de control doble para ODDLS.....	43
Figura 19: Material modelo.....	44
Figura 20: Aplicación de condiciones.....	46
Figura 21: Aplicación de campo ODDLS.....	47
Figura 22: Aplicación de datos iniciales.....	48

Figura 23: Aplicación de datos de módulos.....	50
Figura 24: Aplicación de turbulencia.....	51
Figura 25: Aplicación datos del problema.....	52
Figura 26: Datos Excel.....	53
Figura 28: Generación de malla.....	55
Figura 29: Datos de malla.....	55



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto es aprender a manejar un software informático que se basa en los elementos finitos como herramienta de cálculo CFD (computational fluids dynamics) y estudiar un caso práctico. El programa a utilizar a lo largo de este proyecto es Tdyn del cual se hablará más adelante sobre él y su funcionamiento para el caso de un catamarán y se explicarán unas nociones básicas para tener una idea de cómo funciona dicho programa.

Siguiendo los pasos previstos por el tutorial donde nos dice que para tener una visualización realista de los resultados para un cálculo cualquiera se necesita un volumen de control óptimo para el cual las medidas están fijadas más adelante y un mallado fino de dicho volumen, ya que un mallado grueso o un gran volumen de control pueden distorsionar los resultados y hacer que el cálculo tarde mucho más tiempo del que debe tardar.

Se comprobará la viabilidad de un caso práctico estudiando el casco de un catamarán haciéndolo correr a varias velocidades ya fijadas para conocer sus características hidrodinámicas sin la necesidad de hacer un modelo a escala y ensayarlo en un canal de experiencias y se hallará la curva resistencia-velocidad para tener una idea básica de su comportamiento.

Mediante este tipo de programas lo que se puede comprobar sobre todo es si se pueden acoplar bulbos, cambiar formas, aumentar dimensiones de un casco... Para optimizar la navegación reduciendo al máximo la resistencia, utilizando la menor potencia posible y desarrollando la mayor velocidad que se pueda.

Actualmente este tipo de programas están en continuo desarrollo por su gran utilidad en muchos campos aparte del de la ingeniería naval.



Los resultados obtenidos de los diferentes cálculos se dividen en deformación de la superficie libre, campo de velocidades, campo de presiones, gráfico de fuerzas y fuerzas en contornos.

La estructuración de este proyecto es la siguiente:

- **Mecánica de fluidos:** introducción y aspectos teóricos a los fluidos
- **Los CFD's:** introducción a los CFD's
- **Tdyn:** introducción a Tdyn y nociones básicas
- **Viabilidad de un caso práctico:** estudio del casco del catamarán a diferentes velocidades.
- **Visualización y comentario de resultados:** visualización y comentario de todos los resultados obtenidos y hallar la curva resistencia-velocidad.



2. 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 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

Para clasificar a los materiales que se encuentran en la naturaleza se pueden utilizar diversos criterios. Desde el punto de vista de la ingeniería, uno de los más interesantes lo constituye aquel que considera el comportamiento de los elementos frente a situaciones especiales. De acuerdo a ello se definen los estados básicos de sólido, plástico, fluidos y plasma. De aquí la de definición que nos interesa es la de fluidos, la cual se clasifica en líquidos y gases.

La clasificación de fluidos mencionada depende fundamentalmente del estado y no del material en sí. De esta forma lo que define al fluido es su comportamiento y no su composición. Entre las propiedades que diferencian el estado de la materia, la que permite una mejor clasificación sobre el punto de vista mecánico es la que dice la relación con la forma en que reacciona el material cuando se le aplica una fuerza.



Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. Si se compara lo que ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte o tangencial se tienen reacciones características que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos.

Con base al comportamiento que desarrollan los fluidos se definen de la siguiente manera: "Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea se escurre, cuando está sometido a un esfuerzo de corte o tangencial". De esta definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

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 FLUIDOS

La solución de cualquier problema de flujo de fluidos requiere un conocimiento previo de las propiedades físicas del fluido en cuestión. Valores exactos de las propiedades de los fluidos que afectan a su flujo, principalmente la viscosidad y el peso específico, han sido establecidos por muchas autoridades en la materia para todos los fluidos utilizados normalmente; notemos además que en cada estado, la condición de la sustancia es única y está descrita por sus propiedades.



2.2.1. Masa específica, peso específico y densidad

Se denomina masa específica a la cantidad de materia por unidad de volumen de una sustancia. Se designa por P y se define: $P = \lim (m/v)$

$$v \rightarrow 0$$

El peso específico corresponde a la fuerza con que la tierra atrae a una unidad de volumen. Se designa por β . La masa y el peso específico están relacionados por:

$$\beta = gP$$

Donde g representa la intensidad del campo gravitacional.

Se denomina densidad a la relación que exista entre la masa específica de una sustancia cualquiera y una sustancia de referencia. Para los líquidos se utiliza la masa específica del agua a 4°C como referencia, que corresponde a 1g/cm^3 y para los gases se utiliza al aire con masa específica a 20°C y $1,013\text{ bar}$ de presión es $1,204\text{ kg/m}^3$.

2.2.2. Viscosidad.

La viscosidad es una propiedad distintiva de los fluidos. Está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se le somete a un esfuerzo de corte. Esta propiedad es utilizada para distinguir el comportamiento entre fluidos y sólidos. Además los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo a la relación que exista entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

Supóngase que se tiene un fluido entre dos placas paralelas separada a una distancia pequeña entre ellas, una de las cuales se mueve con respecto de la otra. Esto es lo que ocurre aproximadamente en un descanso lubricado. Para que la placa superior se mantenga en movimiento con respecto a la inferior, con una diferencia de velocidades V , es necesario aplicar una fuerza F , que por unidad se traduce en un esfuerzo de corte, $\eta = F / A$, siendo A el área de la placa en contacto con el fluido. Se puede constatar además que el fluido en contacto con la placa inferior, que está en reposo, se mantiene adherido a ella y por lo tanto no se mueve.



Por otra parte, el fluido en contacto con la placa superior se mueve a la misma velocidad que ella. Si el espesor del fluido entre ambas placas es pequeño, se puede suponer que la variación de velocidades en su interior es lineal, de modo que se mantiene la proporción:

$$\frac{dV}{dY} = \frac{V}{Y}$$

2.2.3. Viscosidad cinemática

Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. En el sistema internacional (SI) la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo (m^2/s).

Volumen específico Es el inverso de la densidad. Se designa mediante la letra F y sus unidades en el sistema internacional (SI) son el metro cúbico por kilogramo (m^3/kg).

2.2.4. Compresibilidad

La compresibilidad representa la relación entre los cambios de volumen y los cambios de presión a que está sometido un fluido. Las variaciones de volumen pueden relacionarse directamente con variaciones de la masa específica si la cantidad de masa permanece constante. En general se sabe que en los fluidos la masa específica depende tanto de la presión como de la temperatura de acuerdo a la ecuación de estado.

2.2.5. Presión de vapor

Los fluidos en fase líquida o gaseosa dependiendo de las condiciones en que se encuentren. Las sustancias puras pueden pasar por las cuatro fases, desde sólido a plasma, según las condiciones de presión y temperatura a que estén sometidas. Se acostumbra designar líquidos a aquellos materias que bajo las condiciones normales de presión y temperatura en que se encuentran en la naturaleza están en esa fase.

Cuando un líquido se le disminuye la presión a la que está sometido hasta llegar a un nivel en el que comienza a bullir, se dice que alcanzado la presión de vapor. Esta presión depende de la temperatura. Así por ejemplo, para el agua a 100°C, la presión es de aproximadamente de 1 bar, que equivale a una atmósfera normal. La presión de vapor y la temperatura de ebullición están relacionadas y definen una línea que separa y el líquido de una misma sustancia en un grafico de presión y temperatura.

2.2.6. 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 (N/m^3) o fuerza másica específica g (g/s^2).

$$\left\{ \begin{array}{l} f = \frac{dF_m}{dV} \\ g = \frac{dF}{dM} \end{array} \right. \quad f = \rho * g$$

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.

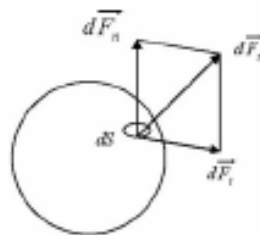


Figura 1: Fuerzas de superficie



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 = presión (N/m²), F = fuerza (N), A = área (m²)

2.2.7. Valores típicos de las propiedades de fluidos más usuales

Propiedad	Designación	Unidades	Valores	
			Agua	Aire
Masa específica	P	kg/m ³	1.000	1,2
Viscosidad	β	g/ms	1,0	0,02
Calor específico	Cp	J/kg°K	4.200	1.008
Presión de vapor (20°)	Pv	bar	0,023	-
Tensión Superficial	δ	mN/m	72,8	-

Figura 2: valores de propiedades de fluidos

2.3. TIPOS DE FLUIDOS

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.

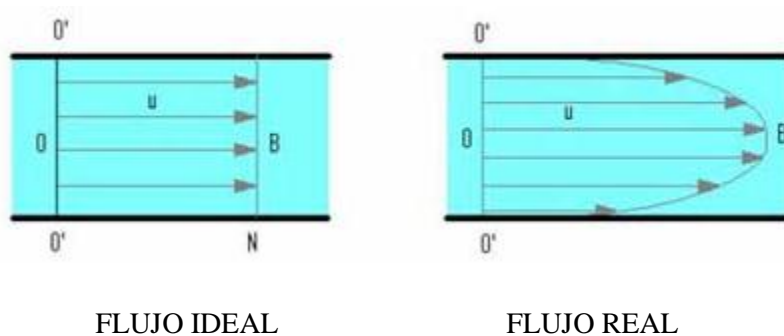


Figura 3: Tipos de flujo

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)



2.4. FLUJO DE FLUIDOS

Los flujos de fluidos pueden ser clasificados como: estacionario o no estacionario; permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; laminar o turbulento; unidimensional, bidimensional, tridimensional y rotacional o irrotacional.

2.4.1. Estacionario o no estacionario

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

2.4.2. Permanente o no permanente

El flujo permanente tiene lugar cuando, en un punto cualquier, la velocidad de las sucesivas partículas que ocupan ese punto en los sucesivos instantes es la misma. Por tanto, la velocidad es constante respecto del tiempo o bien $\delta V/\delta t = 0$

Un flujo es no permanente cuando las condiciones en un punto cualquiera del fluido varía con el tiempo o bien $\delta V/\delta t \neq 0$

2.4.3. Uniforme o no uniforme

El flujo uniforme tiene lugar cuando el módulo, la dirección y el sentido de la velocidad no varían de un punto a otro del fluido; es decir, $\delta V/\delta s = 0$. Este supuesto implica que las otras magnitudes específicas del fluido no varían con las coordenadas espaciales.

Así un flujo no es uniforme cuando la velocidad, la profundidad, la presión, etc., varían de un punto a otro en la región del flujo; es decir, $\delta V/\delta s \neq 0$



2.4.4. Flujo laminar y turbulento. El número de Reynolds

Se define el flujo laminar, aquel donde las partículas fluidas se mueven según trayectorias paralelas, formando en el conjunto de ellas capas o láminas. Los módulos de las velocidades de capas adyacentes no tienen el mismo valor. El flujo laminar está gobernado por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular. En este caso la viscosidad del fluido es la magnitud predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia.

Por el contrario en el flujo turbulento las partículas se mueven de forma desordenada en todas direcciones, resultando imposible conocer la trayectoria de una partícula individualmente. Reynolds determinó que la transición de régimen laminar a turbulento era función de un único parámetro, el cual se conoce como Número de Reynolds. El número de Reynolds, es un número adimensional, que viene dado por el cociente de las fuerzas de inercia por las fuerzas debidas a la viscosidad.

$$Re = \frac{L\rho v}{\mu}$$

Donde L = longitud (m); ρ = densidad (kg/m^3); v = velocidad (m/s);
 μ = viscosidad del fluido (Ns/m^2)

Así mediante este número se definió el paso de régimen turbulento a laminar. Si este número es superior a 2100 el flujo resultante será turbulento.

2.4.5. Rotacional o irrotacional

Un flujo rotacional es aquel donde la velocidad de cada partícula varía en proporción directa con el centro de rotación.

Un flujo irrotacional es aquel en el que no existen tensiones cortantes.



2.4.6. Flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales

En un flujo unidimensional las particular todas las partículas se mueven a lo largo de una línea, en un flujo bidimensional las partículas se mueven en planos y finalmente en un flujo tridimensional las partículas se mueven en el espacio tridimensional.

2.5. ASPECTOS TEÓRICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS

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

2.5.1. 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.

$$P_1 A_1 V_1 = P_2 A_2 V_2$$

ρ = densidad (Kg/m^3), v = velocidad (m/s), A = sección de paso (m^2)

Esto es lo que se denomina ecuación de continuidad.

2.5.2. Concepto de capa límite

Con los fluidos reales no existe «deslizamiento» en las fronteras rígidas. La velocidad del fluido con respecto a la frontera es cero. Como resultado de esto, el gradiente de la velocidad y el esfuerzo cortante tienen valores máximos en la frontera y disminuyen hacia el interior del fluido. Para el extremo opuesto de una viscosidad muy baja y altas velocidades o aceleraciones del movimiento del fluido; en estos casos, cerca de la pared la pendiente del gradiente de la velocidad se hace muy grande, y el único esfuerzo tangencial viscoso de importancia se encuentra dentro de una capa relativamente delgada, próxima a la frontera. Fuera de esta capa, los gradientes de velocidad disminuyen rápidamente y el esfuerzo tangencial viscoso es pequeño. Esta estrecha zona es llamada capa límite.

Dentro de esta capa, los efectos viscosos sobrepasan a los inerciales, determinando la deformación del fluido. Por fuera de esta capa, el flujo sufrirá solamente una influencia menor de las fuerzas viscosas y estará determinado principalmente por la relación entre la inercia, el gradiente de presión y las fuerzas de cuerpo que están en interacción con la geometría de las fronteras sólidas. En consecuencia, las líneas de corriente del flujo principal, más allá de la capa límite, corresponden esencialmente a un flujo con potencial de velocidades.

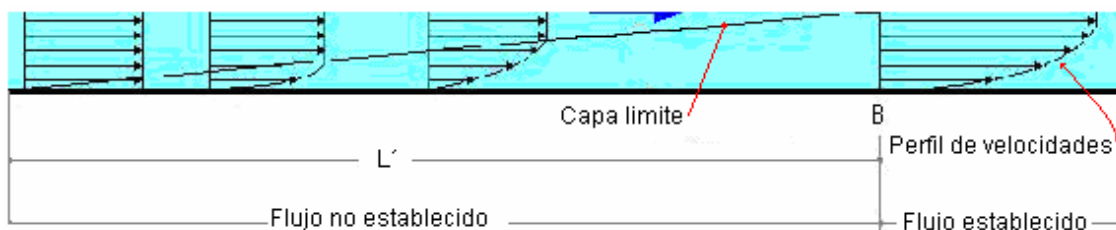


Figura 4: Evolución capa límite

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.

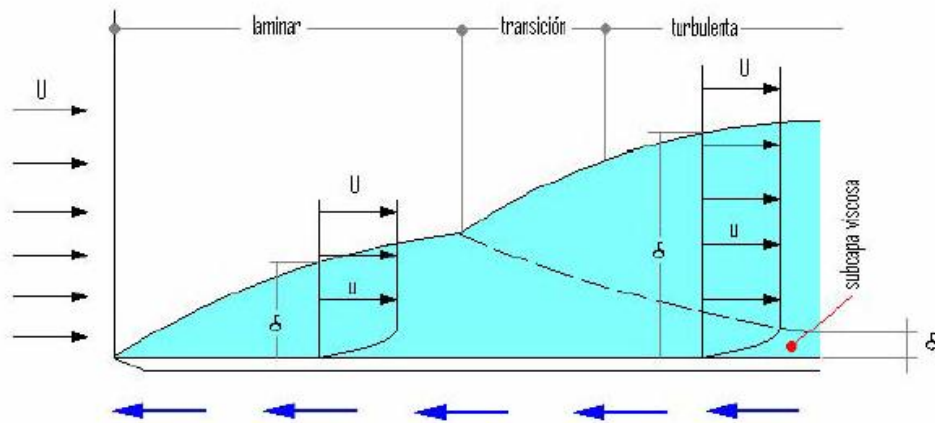


Figura 5: Capa límite y turbulenta a lo largo de una placa lisa

2.5.3. 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:

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = \text{constante}$$



Aunque también puede ser expresada como:

$$\frac{p_1}{\rho g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \text{constante}$$

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

2.5.4. Ecuaciones de Navier – Stokes

Las ecuaciones de Navier – Stokes son un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de un fluido para un caso general, teniendo en cuenta que las fuerzas actúan sobre un elemento infinitesimal

$$\begin{aligned}\frac{dv_x}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y \\ \frac{dv_z}{dt} &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 u_z\end{aligned}$$

Donde ∇^2 , es el operador de Laplace, cuya expresión es:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

ν =viscosidad cinemática



3. CFD'S

La mecánica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que reduce la velocidad de cálculo como así también el margen de error al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.

Uno de los padres de este método de análisis fue Suhas Patankar que es actualmente profesor emérito de la Universidad de Minesota.

El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad, se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.

3.1. HISTORIA DE LOS CFD's

La utilización de los “Canales” de Ensayos Hidrodinámicos, a través de la investigación experimental con modelos, ha sido desde hace tiempo el único medio de predicción del comportamiento del flujo y de las fuerzas que actúan sobre el buque. No obstante, la introducción de análisis matemáticos ha cuestionado la necesidad y prioridad de los ensayos realizados con modelos.



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

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

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.

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 resulta obligatorio utilizar las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes.

La consideración del flujo alrededor de un buque como potencial, permitió a Michell en 1898 hacer más de un siglo el presentar una solución analítica de la resistencia por formación de olas en un buque y así iniciar el interés de los científicos en hidrodinámica en los métodos numéricos.

En 1945 fue cuando Neuman, en un congreso, propuso, por primera vez, usar el ordenador para integrar las ecuaciones de la mecánica de fluidos.

La capacidad de cálculo había mejorado considerablemente y parecía posible encontrar soluciones matemáticas fiables. Con ello se recuperaba la vieja tesis de Lagrange sobre la posibilidad de resolver matemáticamente los problemas que plantea el estudio del movimiento de los fluidos.



Otro punto de partida de los nuevos métodos fue el trabajo de Hess y Smith, publicado en 1962 en donde por primera vez se podía calcular el flujo potencial, en tres dimensiones, alrededor de formas arbitrarias con condiciones en los límites. Dawson en 1977, introdujo la superficie libre, aunque apoyándose en una linealización de la condición de superficie libre. Para hacerlo se partía de una solución de modelo doble y luego se buscaba otra solución imponiendo la condición de superficie libre sobre la propia superficie deformada.

Estas soluciones iniciales se basan en los flujos potenciales asumiendo que el fluido no tiene viscosidad y que el flujo es irrotacional por lo que el campo de velocidades puede obtenerse como gradiente de una función potencial y la ecuación diferencial que rige el proceso es la ecuación de Laplace. Sin embargo, al no tener en cuenta la viscosidad, su alcance es limitado. De esta forma, al principio de los sesenta, el flujo viscoso se calculaba a partir de las ecuaciones de la capa límite bidimensional.

Se pasó posteriormente a considerar la capa límite tridimensional, pero los resultados no eran totalmente satisfactorios en la popa del buque donde el espesor de la capa límite es grande y donde también aparecen fenómenos de separación.

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

Todo esto ha dado lugar a la aparición de una nueva disciplina en el campo de la Mecánica de Fluidos, la comentada “Mecánica de Fluidos Computacional” (CFD) en fase de desarrollo permanente.



3.2. CLASIFICACIÓN DE METODOS CFD's

A continuación se presenta un intento de clasificar y comparar 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.



3.3. LOS CAMPOS HIDRODINÁMICOS DE LOS CFD's

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.



3.4. VALIDACIÓN DE CFD's

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 mallado 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%.



4. 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 *TRANSPARATION Y ODDLEVELSET*.
- 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 este como uno solo.

El análisis de un problema con el programa 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.

4. CÁLCULO

5. POST-PROCESO

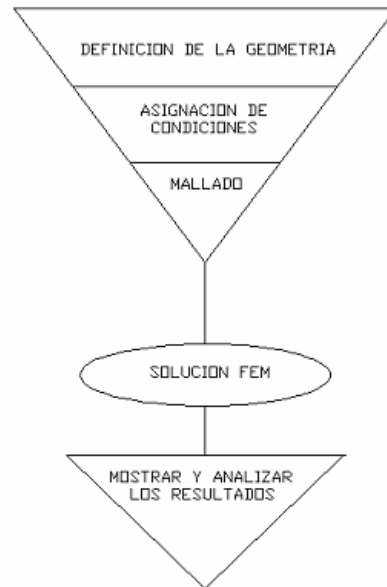


Figura 6: Pasos a seguir en el análisis de un problema

4.1. PRE-PROCESO

El primer paso para la simulación – análisis de un problema, es el establecimiento de este.

El módulo de pre proceso de Tdyn incluye la creación de la geometría del problema o la importación de un archivo tipo CAD, la asignación de las condiciones iniciales, el establecimiento de los límites del problema y de la generación del mallado.

El programa Tdyn posee diferentes tipos de simulación:

- Structural analysis
- Fluid Dynamics & Multi-physics
- Coupled Fluid-Structural Analysis

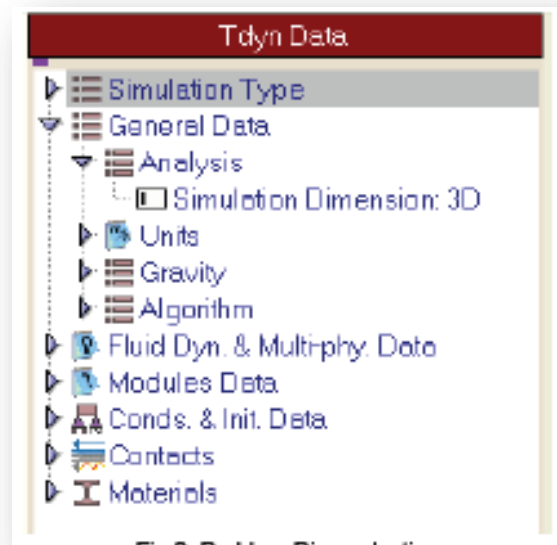


Figura 7: Selección tipo de simulación

4.1.1. CREACIÓN DE GEOMETRÍA

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 (*Rhinoceros*), ya que complica el proceso de importación y puede comportar un mayor número de errores en la definición de las superficies. Así las superficies serán creadas una vez la geometría está insertada en el programa Tdyn.

4.1.2. CONDICIONES

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**.

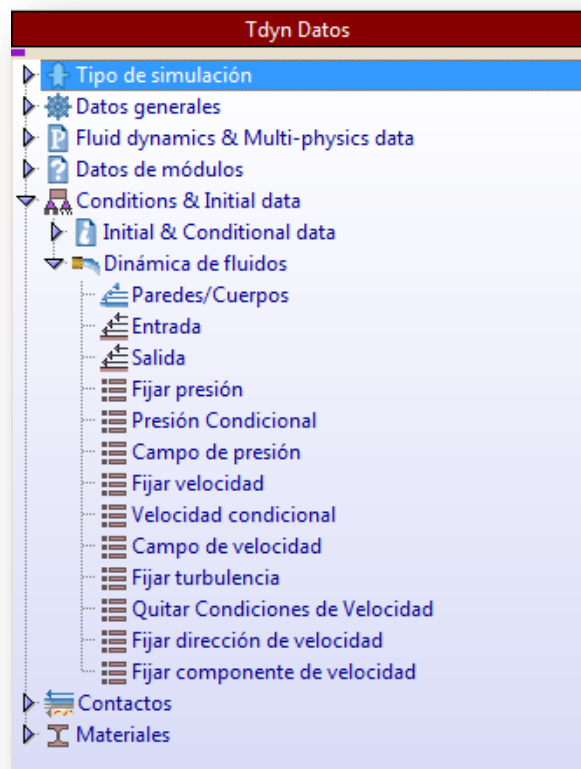


Figura 8: Selección de condiciones



Nota: Si una malla 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.

4.1.2.1 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.

4.1.2.2 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.

4.1.2.3 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.

4.1.2.4 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.

4.1.2.5 QUITAR CONDICIONES DE LA PRESIÓN (REMOVE VELOCITY CONDITION)



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

4.1.2.6 QUITAR 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.

4.1.2.7 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.

4.1.2.8 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.

4.1.2.9 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.

4.1.2.10 CONDICIONES DE SUPERFICIE LIBRE EN “ODDLS”

-Campo ODDLS (ODDLS field): Esta condición se asigna a entidades geométricas / malla y se utiliza para fijar el valor de la función de ajuste dado por el campo OddLevelSet.

-Fijar ODDLS (Fix ODDLS): Esta condición se asigna a entidades geométricas / malla y capas y se utiliza para fijar el valor de la función.

-ODDLS condicional (conditional ODDLs): Esta condición se asigna a entidades geométricas / malla y capas y se utiliza para especificar el valor de la función de ajuste dado por el campo OddLevelSet.

4.1.2.11 CONDICIONES DE SUPERFICIE LIBRE EN “TRANSPARATION”

-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.

4.1.3. MATERIALES

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.

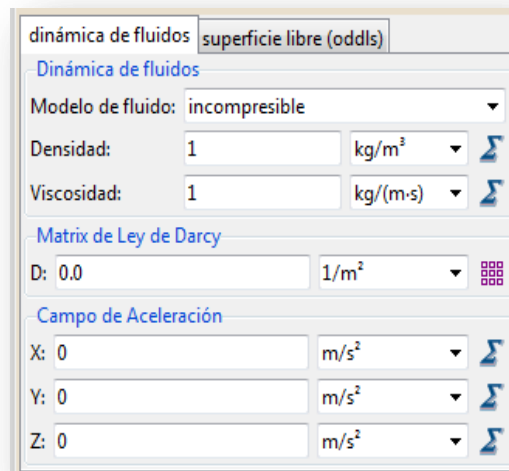


Figura 9: Selección materiales



4.1.3.1 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.

- **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.
- **Matrix de Ley de Darcy:** Coeficiente de la resistencia a la matriz de permeabilidad de definir el flujo en medios porosos (Ley de Darcy). Debido a este efecto, hay una caída de presión dada por:

$$\delta p_i = -(\mu \cdot D \cdot v) / v_i - \delta x_i$$

- **Campo de aceleración:** Vector aceleración externa que actúa sobre el fluido. Se puede definir por constantes o funciones.

Notas: Campo vertical se añadirá a la componente vertical de la gravedad, como una aceleración adicional.

- Condiciones disponibles en modulo de superficie libre ODDLS
 - Fase primaria: El material actual se identifica como fase principal para el análisis de la superficie libre ODDLS. La fase primaria es la fase de interés del análisis. Se presta especial atención teniendo en cuenta con el fin de mejorar la precisión de la solución obtenida para la fase primaria.
 - Fase secundaria: El material seleccionado se identifica como fase secundaria para el análisis de la superficie libre ODDLS.
 - Tensión superficial: La tensión superficial entre las fases primaria y secundaria.



4.1.3.2 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.

4.1.4 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.

tipo de pared	
cuerpo	
Tipo de Pared	
Pared Fluido/Sólido:	Fluid
Tipo de contorno:	Pared Invis
Datos de ángulo	
Ángulo agudo:	20 deg
Fijar Ángulo:	100 deg

Figura 10: Selección de límites



4.1.5. 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.

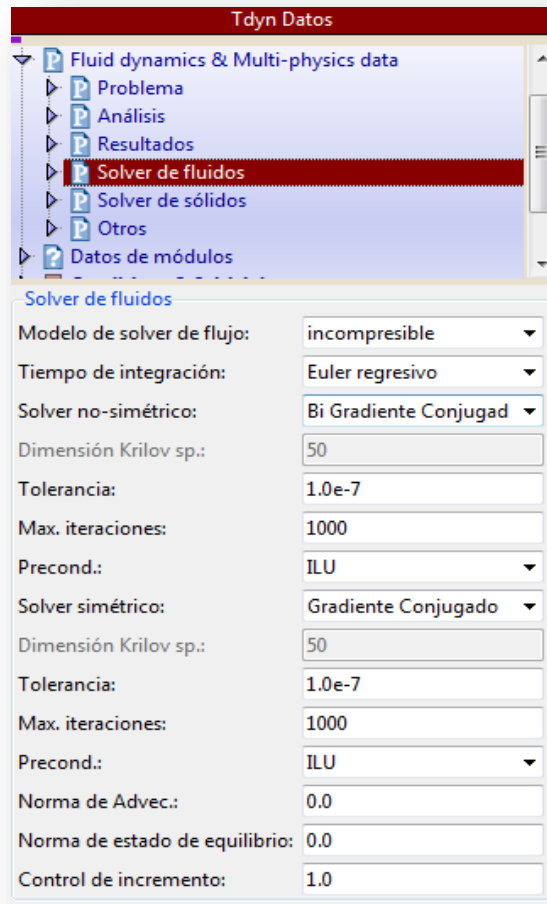


Figura 11: Datos del problema

4.1.6 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 **Mesh>Generate Mesh**. También puede iniciarse esta generación mediante el icono correspondiente.



Figura 12: Icono generar malla

4.3. 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.



Figura 13: Icono lanzar cálculo

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

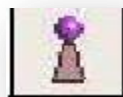


Figura 14: Icono visualización de evolución de proceso

4.4. 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, curva de nivel, iso-superficies, gráficos, etc... También es posible visualizar algunos gráficos de fuerzas y evolución del movimiento mediante los iconos siguientes.

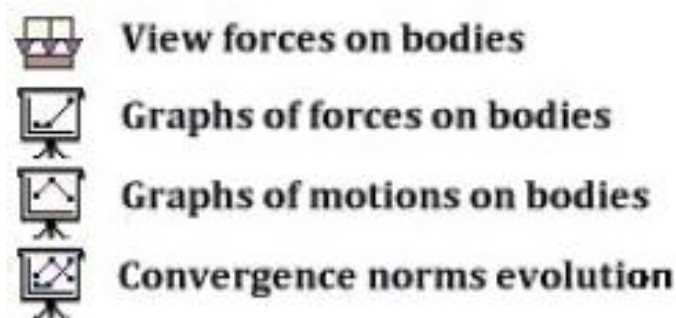


Figura 15: Iconos visualización resultados

Hay que tener en cuenta que los diferentes resultados se agrupan de acuerdo con el tipo de análisis realizado con Tdyn. El tipo de análisis se puede seleccionar en **View Result> Default Analysis / Step**.



5. VIABILIDAD DE CASO PRÁCTICO

En este apartado se realiza una descripción de todos los pasos a seguir para llevar a cabo un estudio de nuestro casco mediante la utilización de este programa, desde la importación de la geometría, hasta las condiciones de contorno a aplicar.

El estudio consiste en estudiar la optimización de un catamarán mediante Tdyn a diferentes velocidades para visualizar aproximadamente su comportamiento navegando a dichas velocidades sin tener resultados experimentales y hallar la curva resistencia-velocidad. Se dice aproximadamente ya que no tenemos resultados experimentales del casco en un canal de experiencias que hasta ahora es más fiable que los programas CFD, así tendremos una ligera idea de su comportamiento navegando.

Una vez se tengan todos los resultados se comentarán y compararán todos ellos con sus gráficos y fuerzas y se verá como es capaz el programa de visualizar todo lo que ocurre sobre el casco de un barco cuando navega sin la necesidad de realizar el proceso experimental del mismo en un canal de experiencias.

Cabe comentar que en este proyecto el problema de superficie libre se realizará mediante *ODDLEVELSET* y no *TRANSPARATION* ya que el primero es un método novedoso y mucho más fiable que el utilizado hasta ahora que era *TRANSPARATION*. De esta forma se ahorra la generación de una cuchara en la popa del barco y su ajuste, el cual se hace casi imposible ya que no tenemos una visualización experimental de la ola generada por dicho casco para poder acoplarla.

5.1. IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA

El primer paso a realizar en el proyecto será la importación del casco del barco a estudiar de Rhinoceros a Tdyn. En este caso el casco que vamos a estudiar es un catamarán con las siguientes características:

- Eslora: 26.00 m
- Manga: 9.00 m
- Manga (1 patín): 2.00 m
- Puntal: 3.00 m
- Calado: 0.80 m

Para realizar la importación se hará mediante **Files>Import.** e importaremos el archivo *****.iges** desde Rhino.

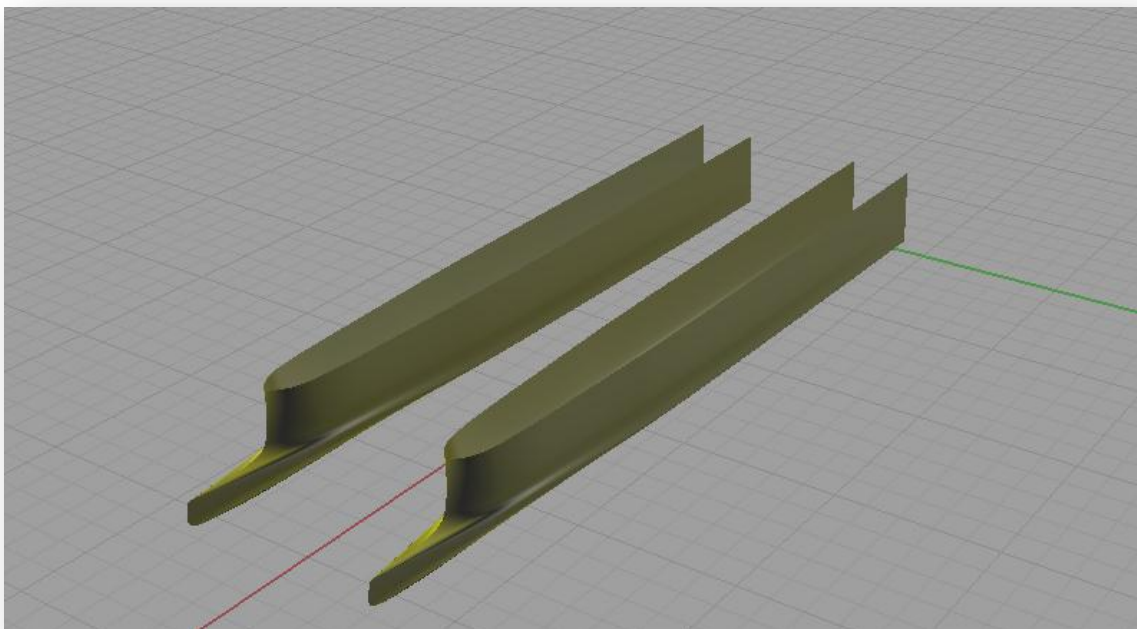


Figura 16: Casco original en Rhinoceros



5.2. 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 que 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.

Cabe destacar que para otro tipo de barcos (monocasco) se hace el estudio con la mitad del casco al ser este simétrico. Para el ejemplo del catamarán se deben utilizar los 2 cascos por su interacción del uno sobre el otro.

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**

Para hallar unas buenas coordenadas para cada punto y generar el volumen de control se utilizan los siguientes parámetros:

- A proa del casco los puntos se tienen que encontrar aproximadamente a una distancia del 70% L (donde L es la eslora) desde la proa del mismo.
- A popa se tienen que encontrar a 140% L de la parte más a popa del casco.
- La distancia a cada lado del casco debe ser del 80% L, medido desde el plano de crujía.
- Por último, para hallar la distancia del fondo del volumen de control se toma el 70% L.

- Para este ejemplo (ODDLS) debemos además subir 2 unidades aproximadamente la superficie creada para la free surface (como se ve en la imagen).

Una vez tenemos los puntos situados los uniremos mediante líneas con la herramienta **Line**. Cuando las líneas ya están situadas lo que hacemos es generar superficies en cada cara de la “caja” mediante la herramienta **NURBS Surface**. Ahora nos queda solo generar el volumen de control a partir de las superficies creadas mediante **Volume>contour**.

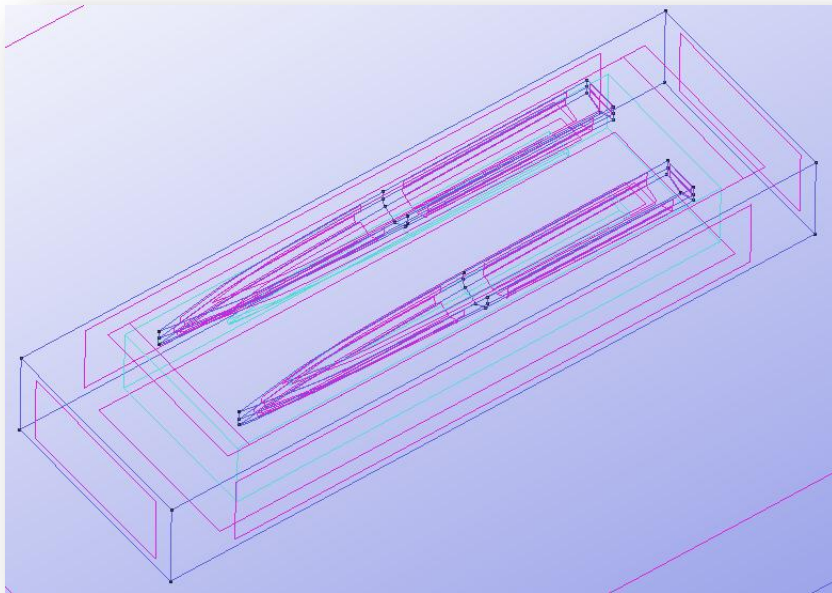


Figura 17: Visualización de volumen de control normal

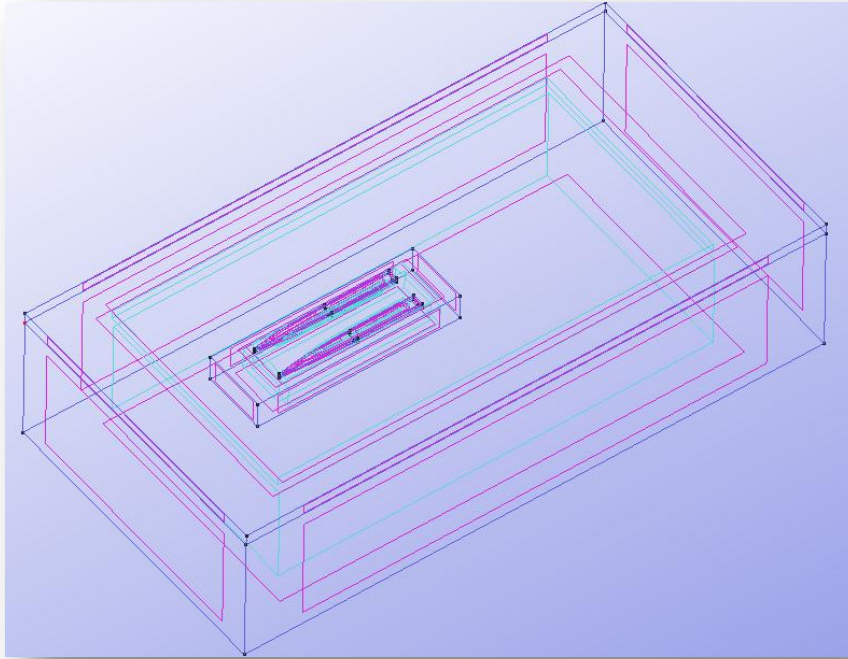


Figura 18: Visualización de volumen de control doble para ODDLs

Como se ve en la figura se han creado 2 volúmenes de control. Esto es recomendable en muchos casos para así afinar más el volumen donde está el casco y obtener resultados mucho más precisos alrededor del casco.

Una vez tenemos el volumen de control generado, el siguiente paso es la inserción de las condiciones del problema.

5.3. MATERIALES

Esta condición se aplicará a todo el volumen de control y se le asignará agua de mar que ya tiene las características definidas por el programa.

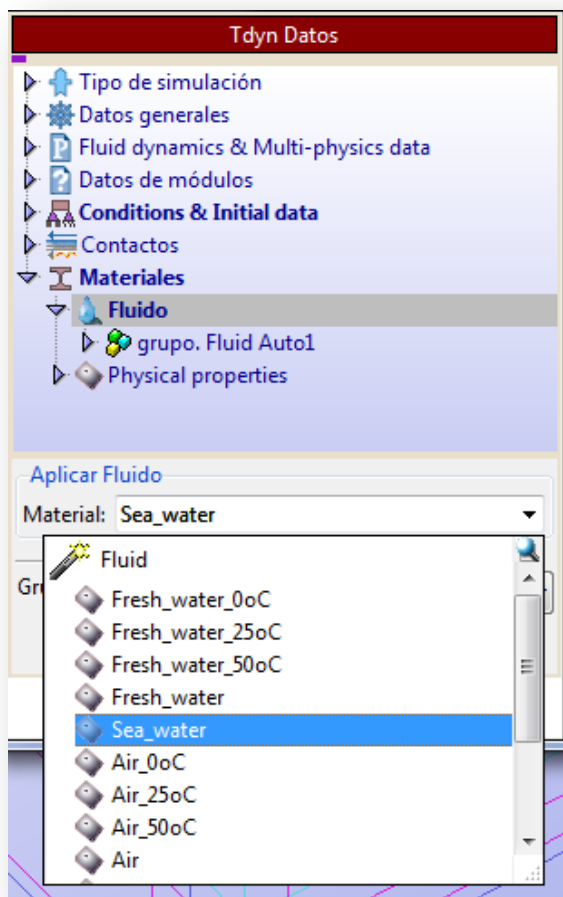
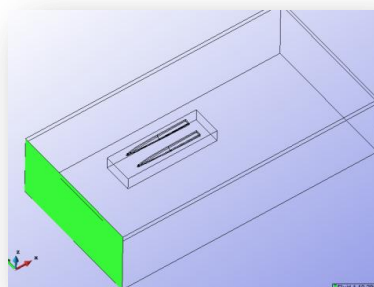
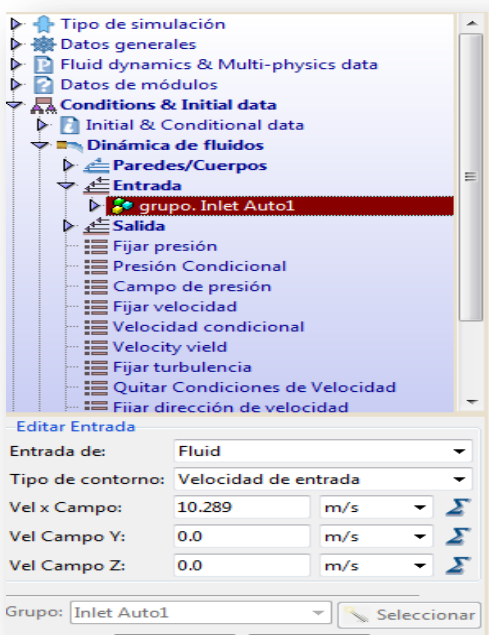
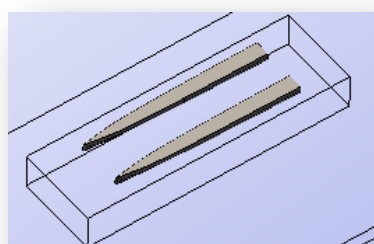
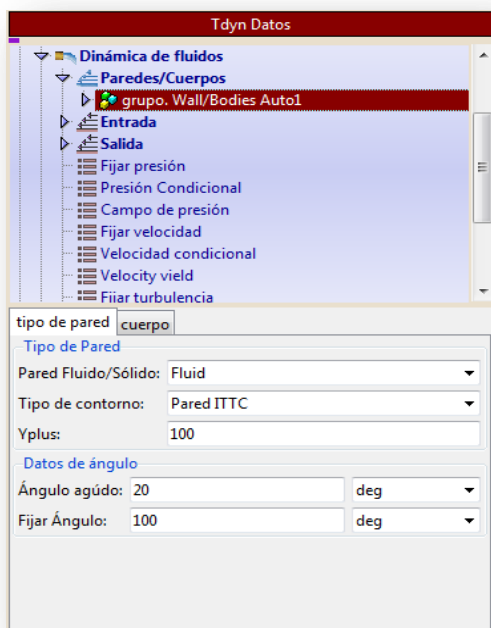


Figura 19: Material modelo

5.4. LÍMITES

Aquí se va a definir los límites de entrada, salida y cuerpos.



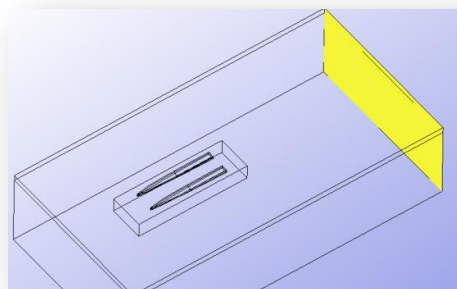
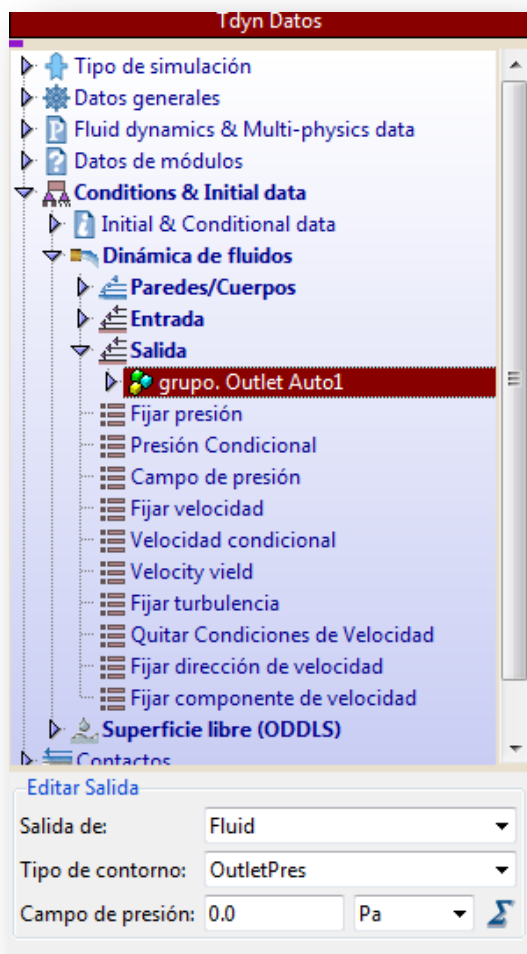


Figura 20: Aplicación de condiciones

En el límite de entrada se aprecia que la velocidad es de 10.289 m/s. Esto se refiere a la velocidad a la que vamos a hacer el estudio. Así pues, tendremos que variarlo para hacer los cálculos para varias velocidades.

5.5. CONDICIONES DE CONTORNO

Para este tipo de cálculo (ODDLS) solo se asignará lo que cierra sobre las superficies libre para ODDLS.

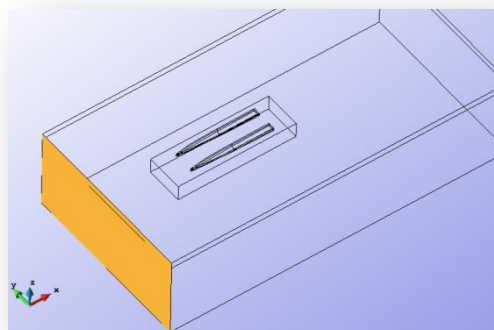
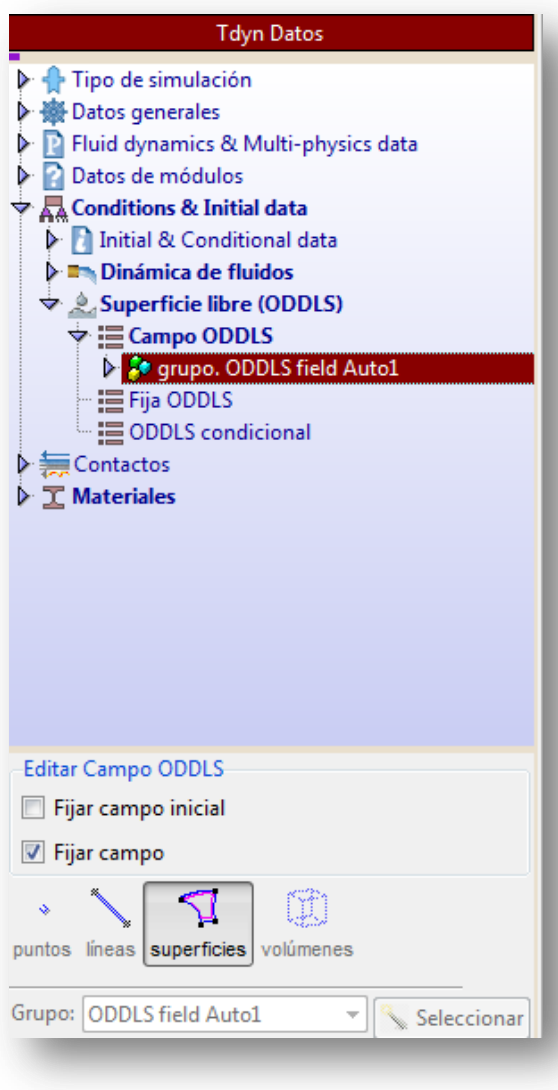


Figura 21: Aplicación de campo ODDLS

5.6. DATOS INICIALES

Los datos iniciales que vamos a colocar es la velocidad a la que se quiere realizar el estudio, el valor de la energía cinética (EddyKEner), la longitud de vórtice (EddyKLength) y el campo OddLevelSet, tal y como se ve en la imagen.

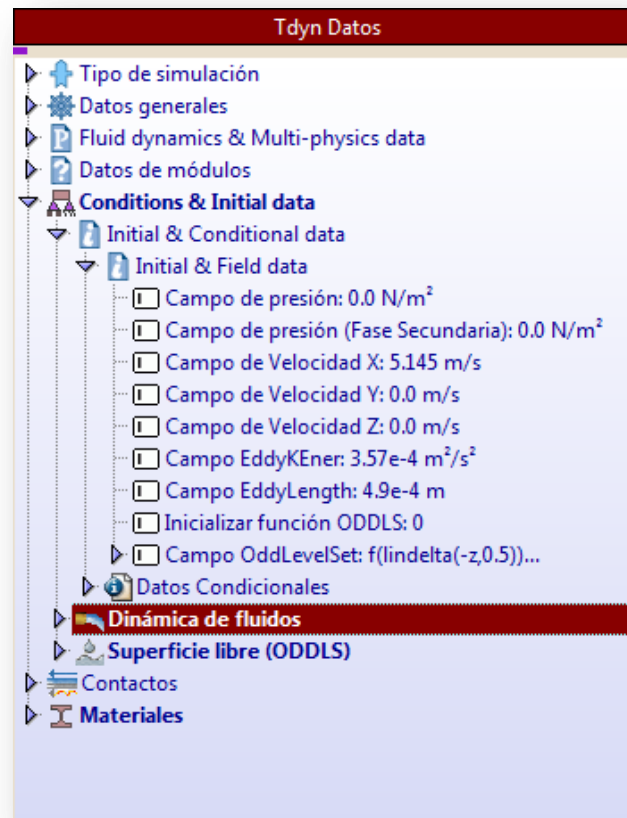


Figura 22: Aplicación de datos iniciales

Para hallar el valor de la energía cinética y la longitud de vórtice se usan las siguientes ecuaciones:

-Energía cinética:
$$K_t = \frac{3}{2} * (TIL \cdot V)^2$$



Donde **TIL** es el nivel de intensidad de la turbulencia que para este caso se coge un valor aproximadamente de 0.5 y **V** es la velocidad del flujo.

-Longitud vórtice:
$$\mathbf{L}_t = \frac{\mu_t * \mu}{\mu \rho * V_t}$$

El ratio entre la viscosidad turbulenta y la molecular (la del fluido) $\mu_t/\mu=5$, μ y ρ es la viscosidad y la densidad del medio respectivamente. $V_t = (K_t)^{0.5}$

Para el campo OddLevelSet se añade la siguiente función para este tipo de problemas:

$$\mathbf{Lindelta}(-z,0.5)$$

5.7. MÓDULO DE DATOS

En este apartado vamos a definir el tipo de turbulencia, presiones, y simetría de los planos.

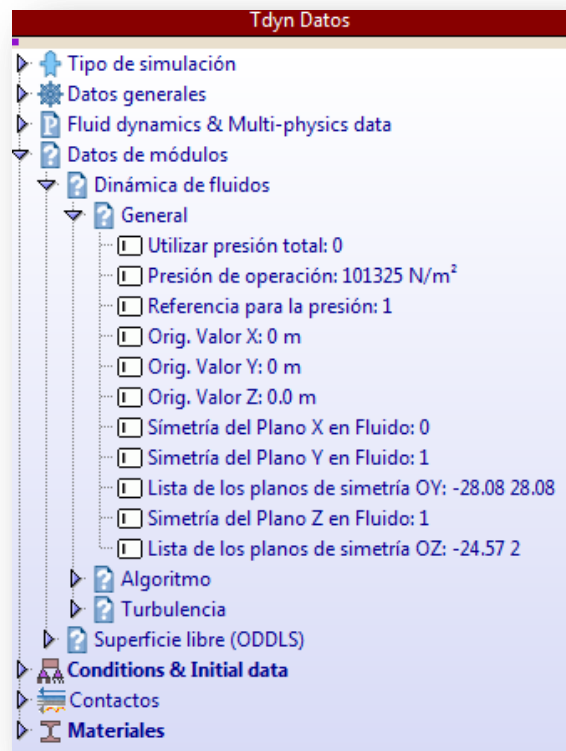


Figura 23: Aplicación de datos de módulos

Como se aprecia en la imagen se puede ver que los planos de simetría en este problema son:

-Plano OY: -28.08, 28.08

-Plano OZ: -24.57, 2

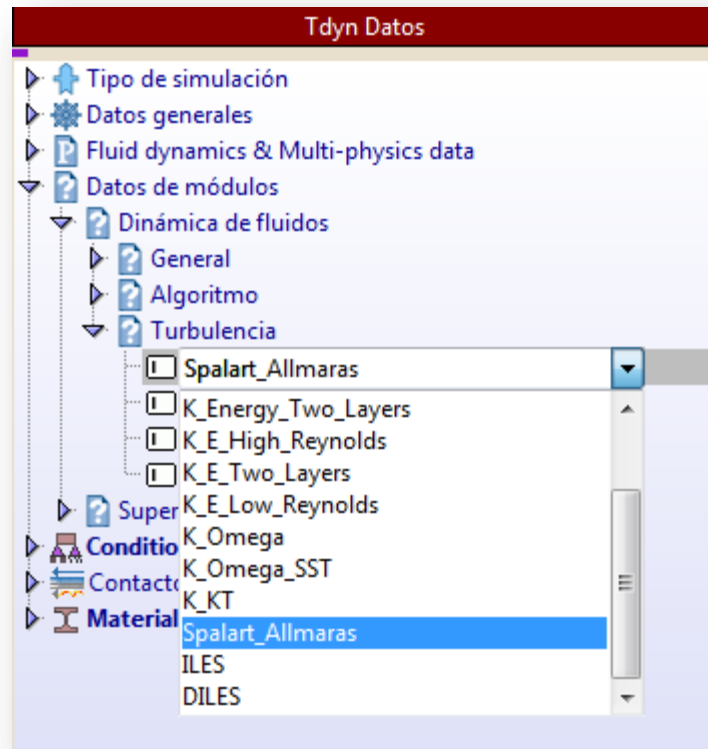


Figura 24: Aplicación de turbulencia

Utilizamos el tipo de turbulencia Spalart-Allmaras ya que es tipo que abarca gran cantidad de problemas y para este es el que mejor se adapta.

5.8. DATOS DEL PROBLEMA

Para finalizar la inserción de datos y condiciones de este problema se define el número de pasos, iteraciones, incremento de tiempo...

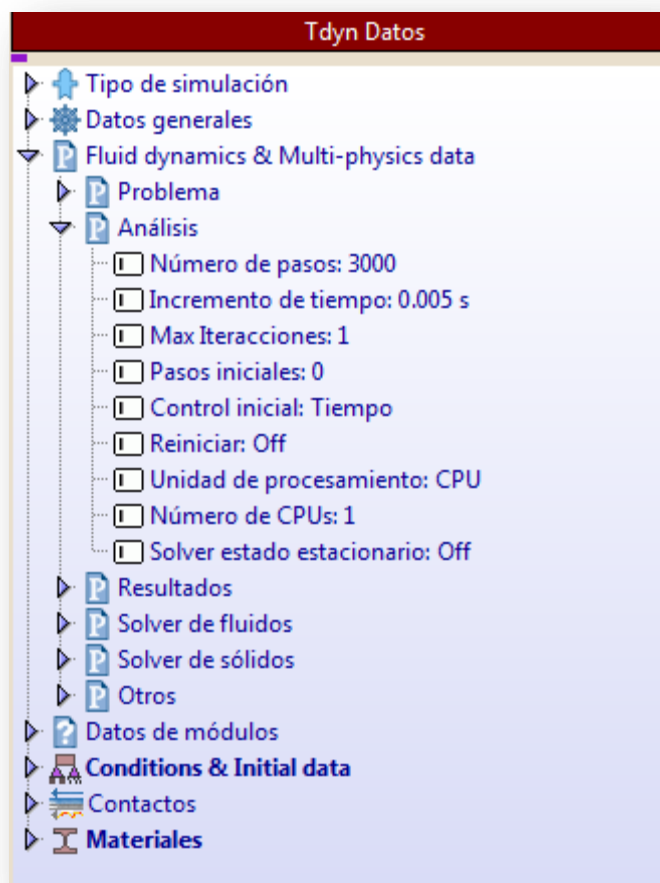


Figura 25: Aplicación datos problema

Para hallar el número de pasos e incremento de tiempo se deben realizar las siguientes ecuaciones:

$$-N^{\circ} \text{ pasos: } 1000 \cdot dt \cdot \frac{V}{LD}$$

Donde dt es el incremento de tiempo y V y L es velocidad y eslora característica.

$$-\text{Incremento de tiempo: } \frac{C \cdot LD}{V} \quad 0.1 < C < 0.01$$

Los demás datos se pueden dejar definidos tal y como están en el programa.

Como para este estudio se van a realizar diferentes cálculos del mismo casco pero a diferentes velocidades, para ayudarnos a definir el número de pasos, incremento de tiempo, energía cinética y longitud de vórtice, es muy recomendable hacer una tabla de cálculo en Excel e insertar todos los parámetros y formulas para que con solo variar la velocidad nos calcule los otros parámetros necesarios.

		d (m)	0,1290	(mean boundary layer thickness)
		tw (kg/(m·s ²))	29,6362	(wall stress)
visc. Cinemat	1,85E-06	dv (m)	5,45E-05	(viscous sublayer thickness-> Y+ = 5)
visc. (Pa·s)	1,90E-03	h1 (m)	2,73E-05	(aprox. first boundary layer element height)
Density (kg/m ³)	1025,000	TIL	0,0030	
L (m)	26,000	TIL (%)	0,3000	
Re	7,215E+07	Kt	3,57E-04	
Cf	2,185E-03	Vt	1,890E-02	
		mu_t/mu	5,00	
V (m/s)	5,144	mu_t	9,500E-03	
		Lt	4,90E-04	
		h (m)	6,81E-03	(maximum size of body elements)
dh (m)	0,04			
dt (s)	0,0078	Fn	0,3223	<0.3 Bajo
T (s)	21,19	L_cuchara (m)	8,48	>0.6 Alto
steps	2725,00		9,10	
L_dom (m)	109,00			

Figura 26: Datos Excel

-5 Nudos: dt= 0.0156 s

Nº pasos= 2725

$K_t = 8.93 \cdot 10^{-5}$

$L_t = 9.81 \cdot 10^{-4}$

-10 Nudos: dt= 0.0078 s

Nº pasos= 2725

$K_t = 3.57 \cdot 10^{-4}$

$L_t = 3.9 \cdot 10^{-4}$



-15 Nudos: $dt = 0.0052 \text{ s}$
 $N^{\circ} \text{ pasos} = 2725$
 $K_t = 8.04 * 10^{-4}$
 $L_t = 3.27 * 10^{-4}$

-20 Nudos: $dt = 0.0039 \text{ s}$
 $N^{\circ} \text{ pasos} = 2725$
 $K_t = 1.43 * 10^{-3}$
 $L_t = 2.45 * 10^{-4}$

-30 Nudos: $dt = 0.0026 \text{ s}$
 $N^{\circ} \text{ pasos} = 2725$
 $K_t = 3.22 * 10^{-3}$
 $L_t = 1.63 * 10^{-4}$

-40 Nudos: $dt = 0.0019 \text{ s}$
 $N^{\circ} \text{ pasos} = 2725$
 $K_t = 5.72 * 10^{-3}$
 $L_t = 1.23 * 10^{-4}$

-50 Nudos: $dt = 0.0016 \text{ s}$
 $N^{\circ} \text{ pasos} = 2725$
 $K_t = 8.93 * 10^{-3}$
 $L_t = 9.81 * 10^{-5}$

5.9. GENERACIÓN DE MALLA

En esta ventana se aplica el tamaño de la malla y de cada punto, línea, superficie o volumen según se quiera afinar más en cualquier sitio. Para este tipo de problema, como se ha creado un volumen dentro de otro para afinar los resultados en dicho volumen, se le da un tamaño menor que la malla general. Para la malla se ajusta con los siguientes valores:

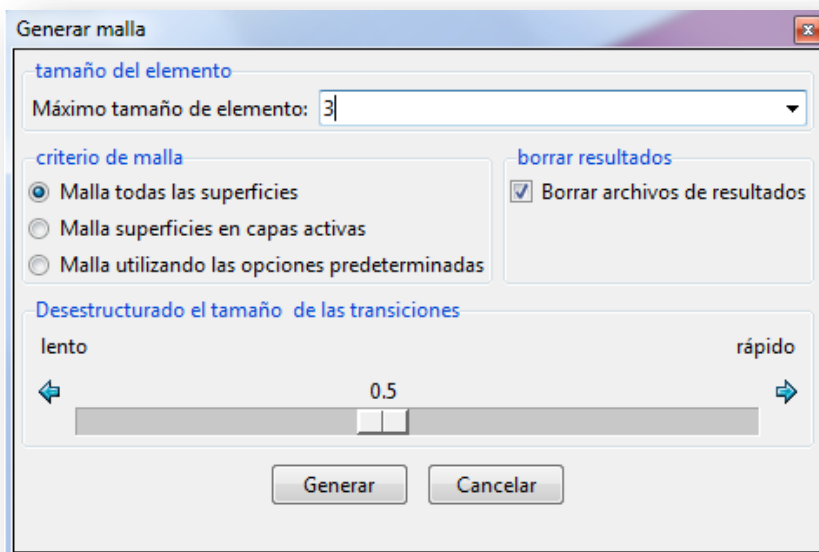


Figura 27: Generación de malla

El tamaño de la malla para estos parámetros es el siguiente:

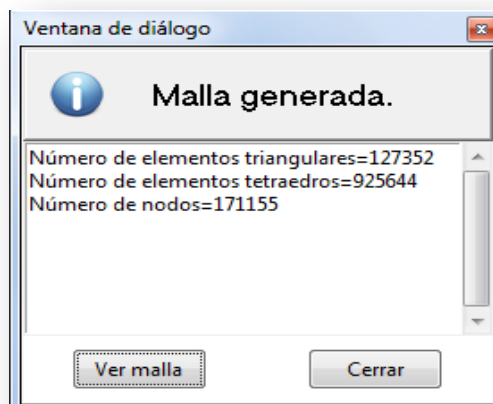


Figura 28: Datos de malla



5.10. CÁLCULO

Mediante el botón que se explicó anteriormente, se selecciona y comienza el proceso de cálculo.

5.11. POST-PROCESO

Mediante el botón anteriormente visto se accede al post-proceso una vez a finalizado el cálculo.



6. VISUALIZACIÓN Y COMENTARIO DE RESULTADOS

A continuación lo que se va a tratar es la visualización de resultados del modelo para cada velocidad estudiada que son: 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 nudos.

Mediante los resultados obtenidos se visualizará la curva resistencia-velocidad para este modelo. Con lo cual se puede tener una previa visualización que se ajusta bastante a la realidad de cómo actuará dicho casco navegando cuando se hagan las pruebas de mar. Como ya se ha explicado este tipo de programas ayudan bastante a la hora de diseñar un barco u optimizarlo pero es necesario contrastar los resultados con las pruebas explícitas de un canal de experiencias.

La visualización de resultados se va a componer de:

- Deformación de la superficie libre
- Campo de velocidades
- Campo de presiones
- Gráficos de fuerzas
- Fuerzas de contornos

Estas últimas se descomponen en la dirección X, Y, Z donde:

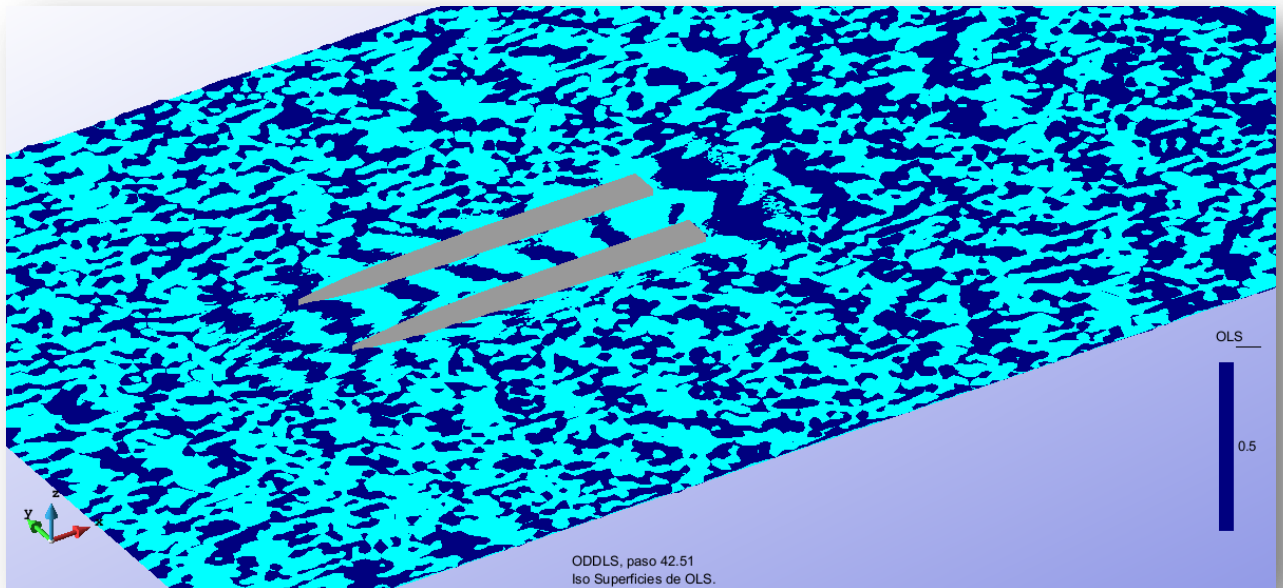
Fuerzas X se refieren a la resistencia de avance.

Fuerzas Y se refieren a la fuerzas de la mitad del barco.

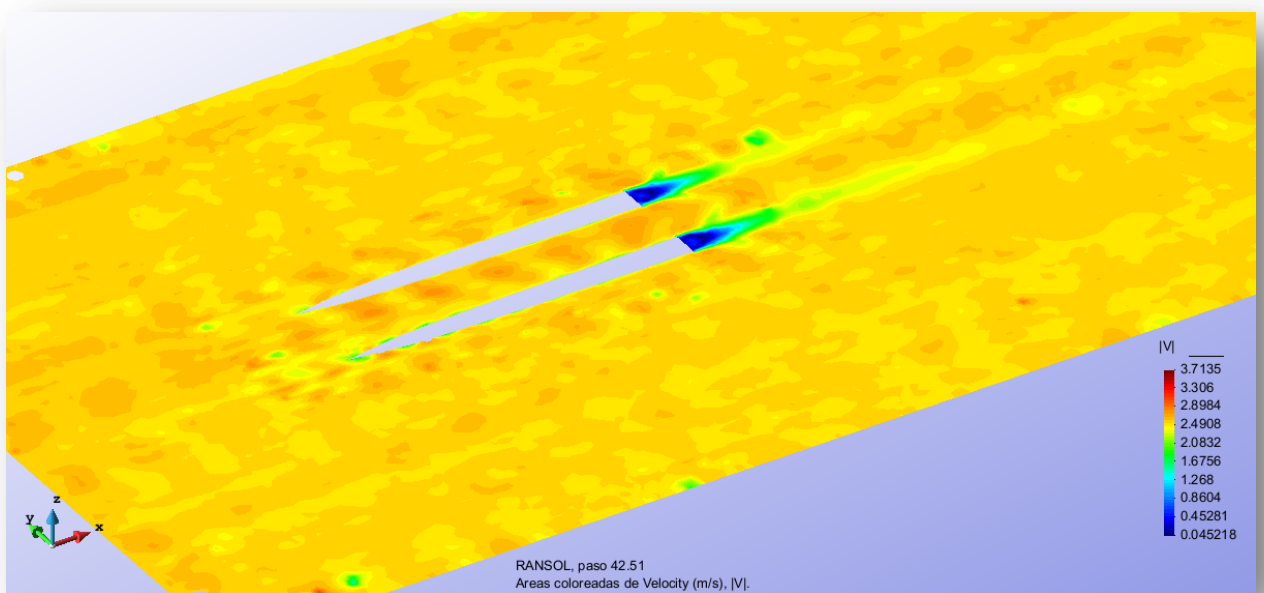
Fuerzas Z se refieren a las de empuje.

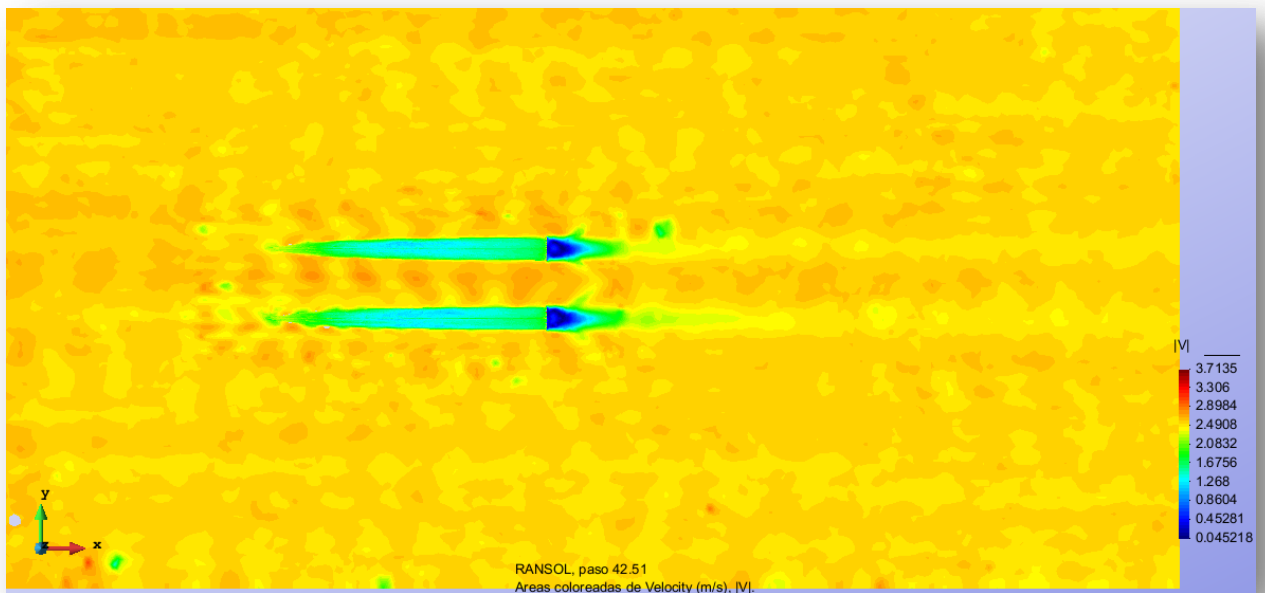
- 5 Nudos

-Deformación de la superficie libre

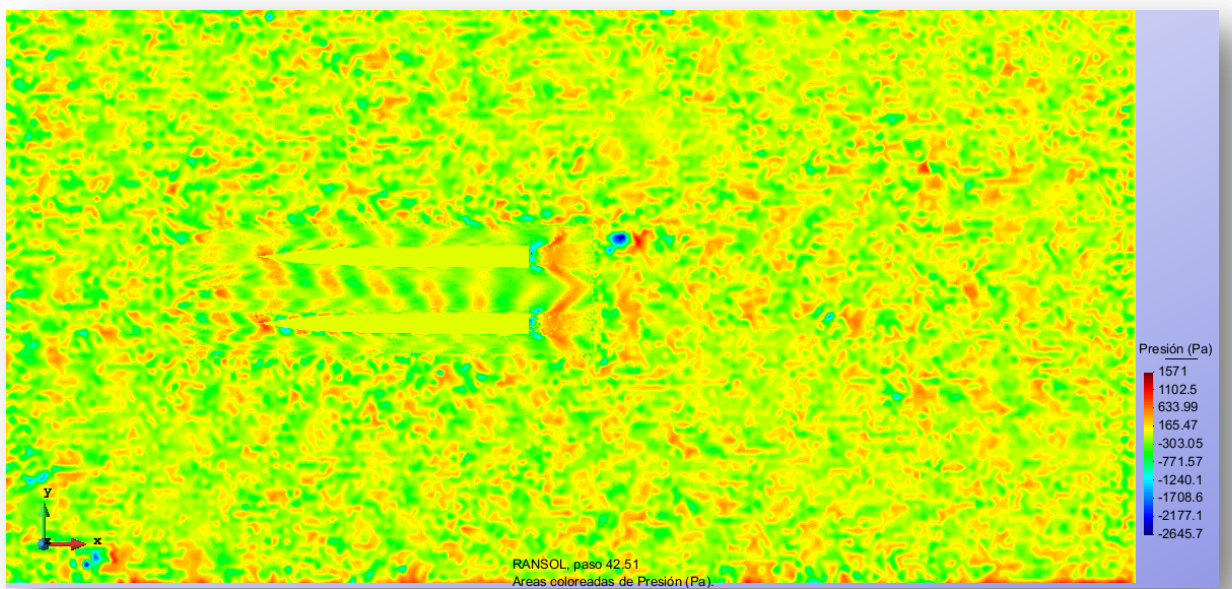


-Campo de velocidades

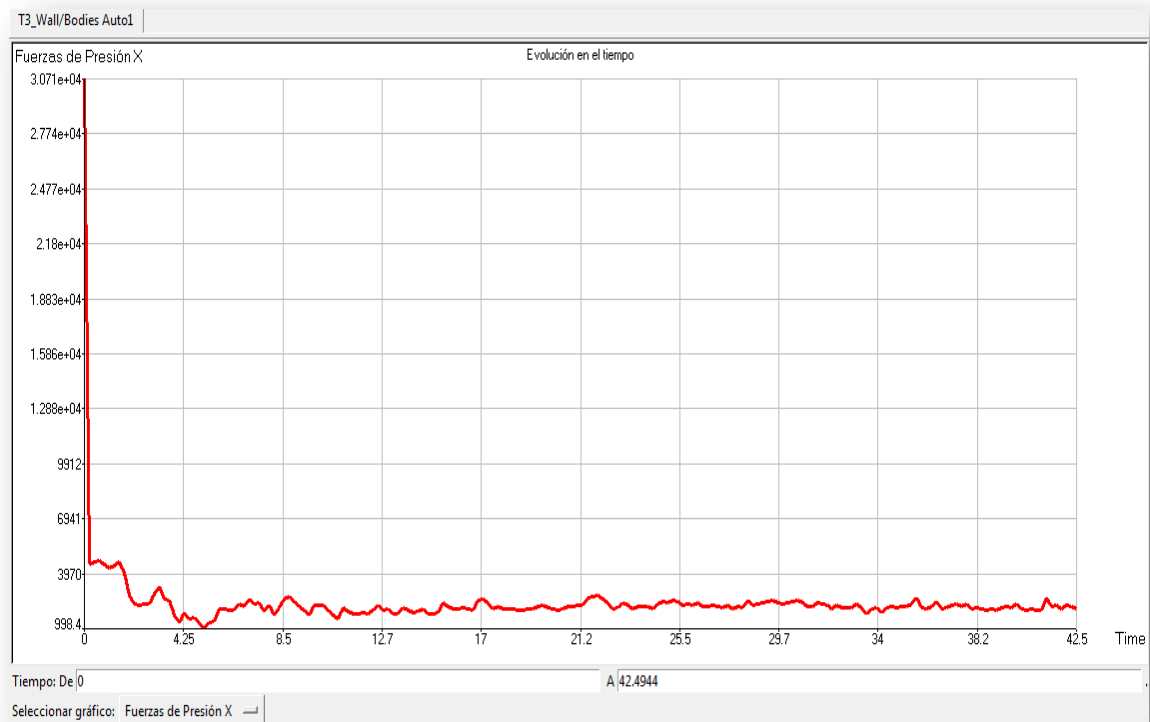


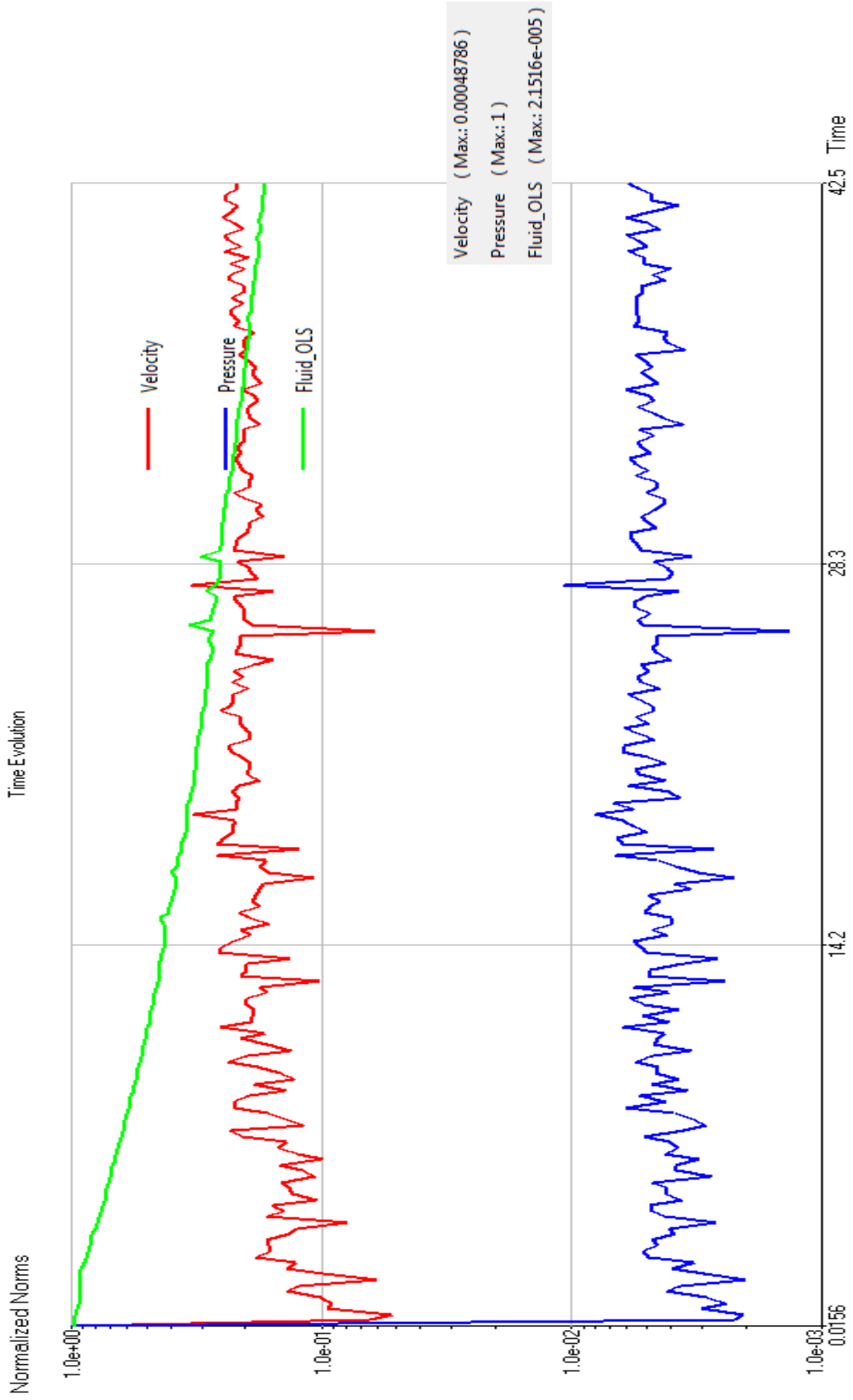


-Campo de presiones



-Grafico de fuerzas





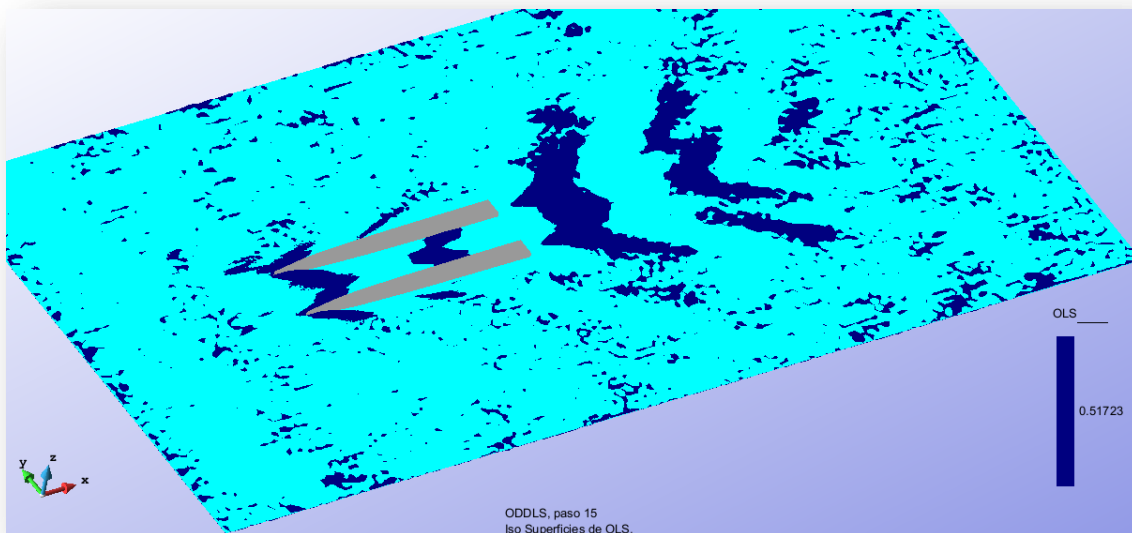


-Fuerzas en contornos

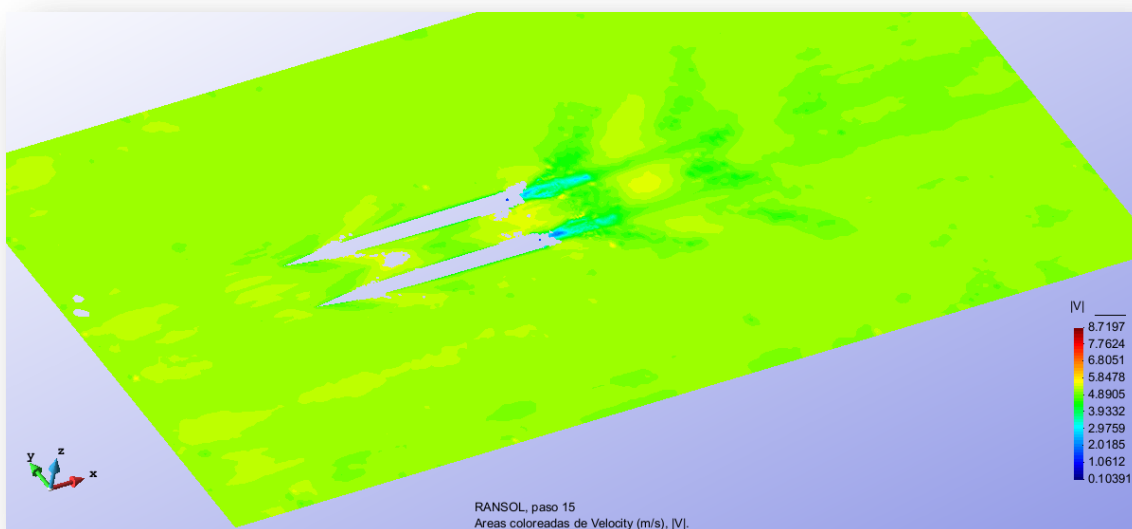
```
Fuerzas en contorno
T3_Wall/Bodies Auto1: (Paso final 42.4944)
Fuerzas de Presión (PFx PFy PFz)
 2085.3 -162.25 -12233
Momentos de Presión (PMx PMy PMz)
-1349.5 5.252e+005 -5172.8
Fuerzas de Presión estática (SPx SPy SPz)
-211.66 354.63 4.8702e+005
Momentos de Presión estática (SMx SMy SMz)
-40.932 -2.0193e+007 11885
Fuerzas de Viscosidad (VFX VFY VFZ)
 1037.6 -2.7881 -20.376
Momentos de Viscosidad (VMx VMy VMz)
-19.479 219.75 -260.81
Fuerzas Totales
 2911.2 189.59 4.7476e+005
Momentos totales
-1409.9 -1.9667e+007 6451.6
*****
*****
Nota:
  Las Fuerzas de Presión se calculan integrando la presión en la superficie
  La Fuerzas de Presión Estática se calculan integrando la presión estática en la superficie
  Las Fuerzas de Viscosidad se calculan integrando las tensiones de viscosidad en la superficie
  Los tres componentes cartesianos de fuerzas y momentos se dan en ambos casos
  Las unidades son las unidades de salida definidas por el usuario
```

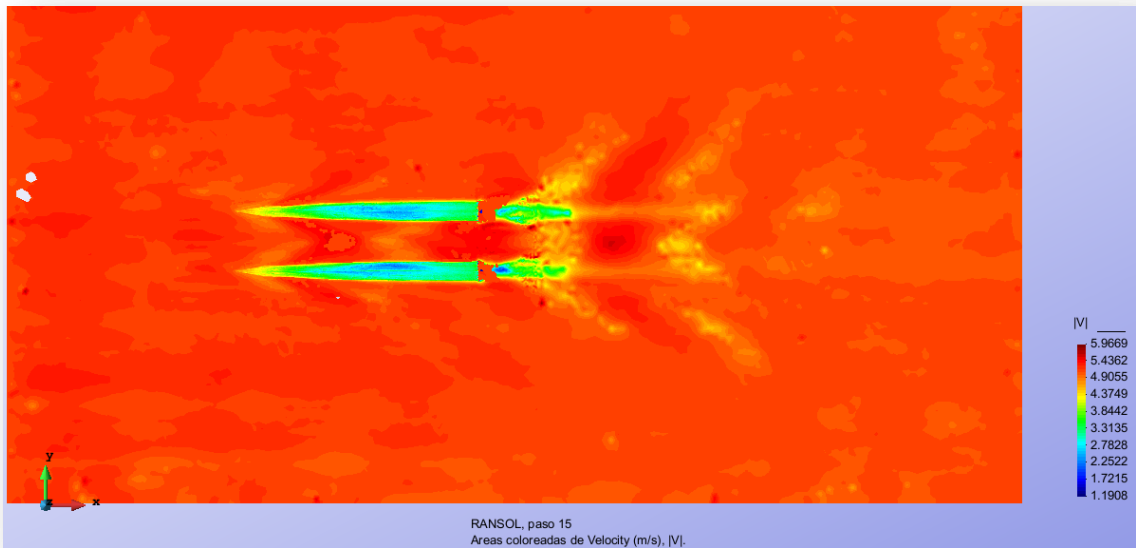
- 10 Nudos

-Deformación de superficie libre

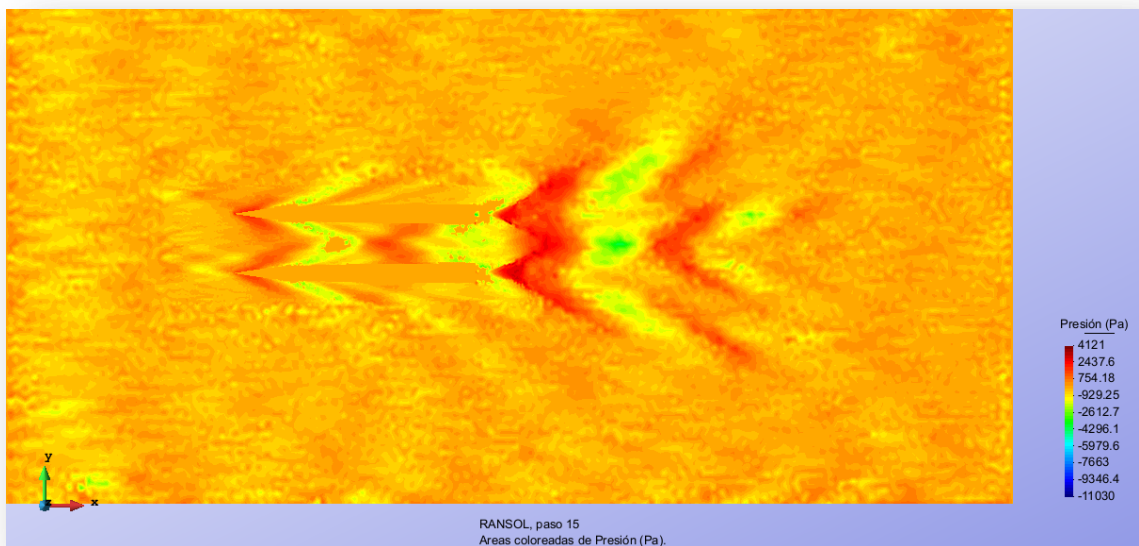


-Campo de velocidades

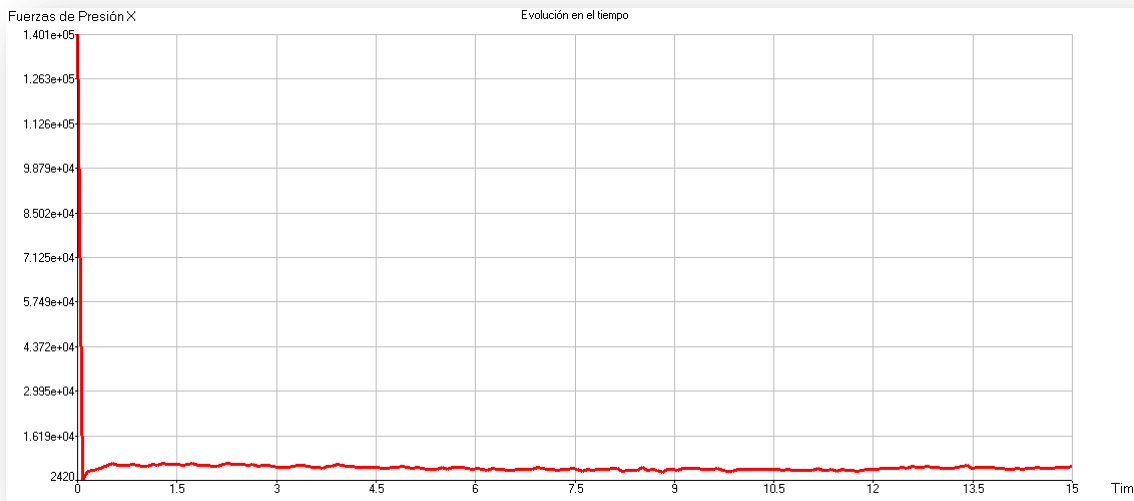




-Campo de presión



-Grafico de fuerzas

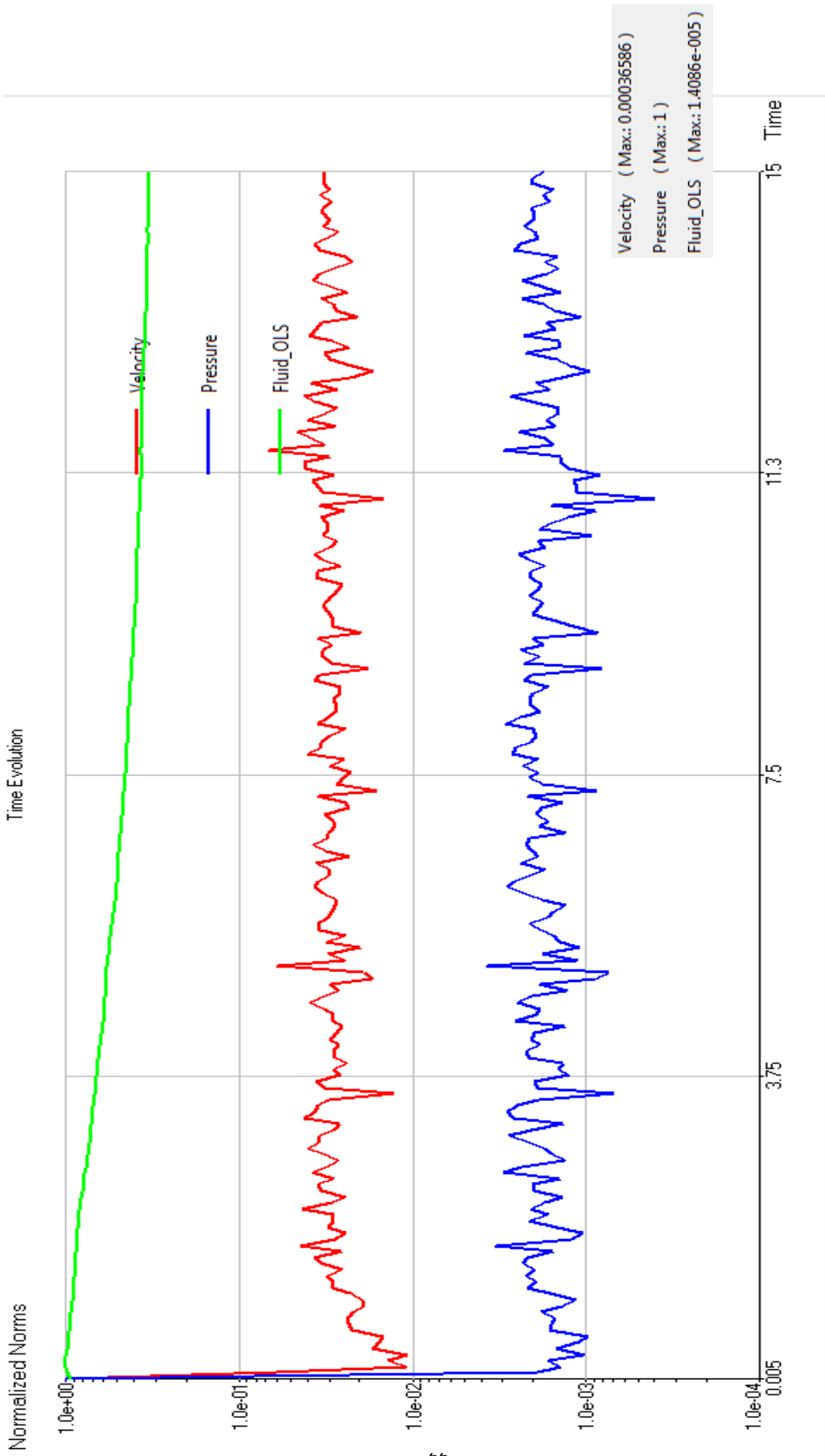


-Fuerzas de contorno

```

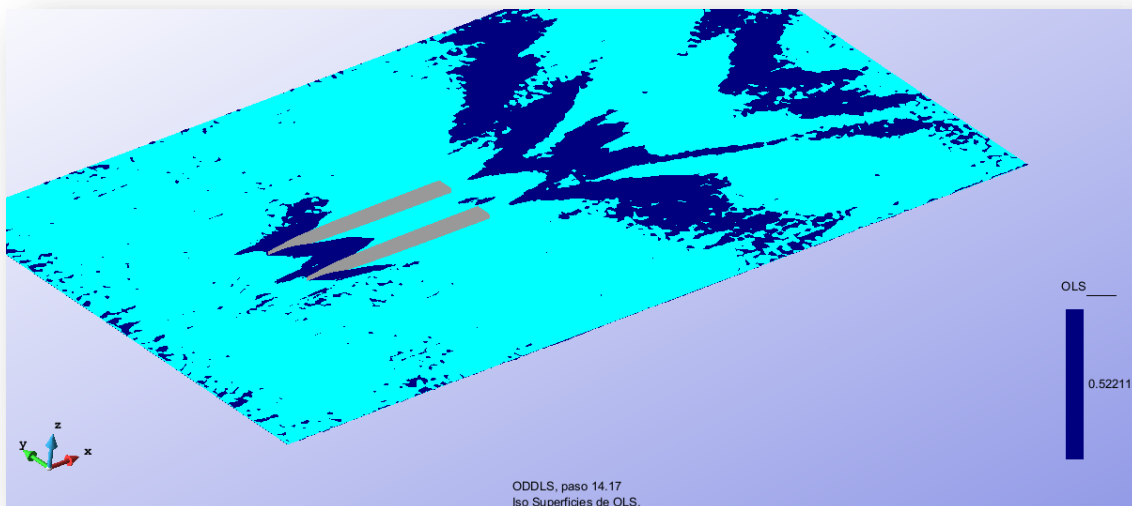
T3_Wall/Bodies Auto1: (Paso final 14.995)
Fuerzas de Presión (PFx PFy PFz)
6901.1 -234.14 -39762
Momentos de Presión (PMx PMy PMz)
952.29 1.6939e+006 -9536.9
Fuerzas de Presión estática (SPx SPy SPz)
-83.46 278.36 4.8697e+005
Momentos de Presión estática (SMx SMy SMz)
-185.9 -2.0191e+007 6689.9
Fuerzas de Viscosidad (VFx VFy VFz)
3803.3 -1.3061 -70.273
Momentos de Viscosidad (VMx VMy VMz)
-46.436 671.64 -234.95
Fuerzas Totales
10621 42.917 4.4714e+005
Momentos totales
719.95 -1.8497e+007 -3081.9
*****
*****
Nota:
Las Fuerzas de Presión se calculan integrando la presión en la superficie
La Fuerzas de Presión Estática se calculan integrando la presión estática en la superficie
Las Fuerzas de Viscosidad se calculan integrando las tensiones de viscosidad en la superficie
Los tres componentes cartesianos de fuerzas y momentos se dan en ambos casos
Las unidades son las unidades de salida definidas por el usuario

```

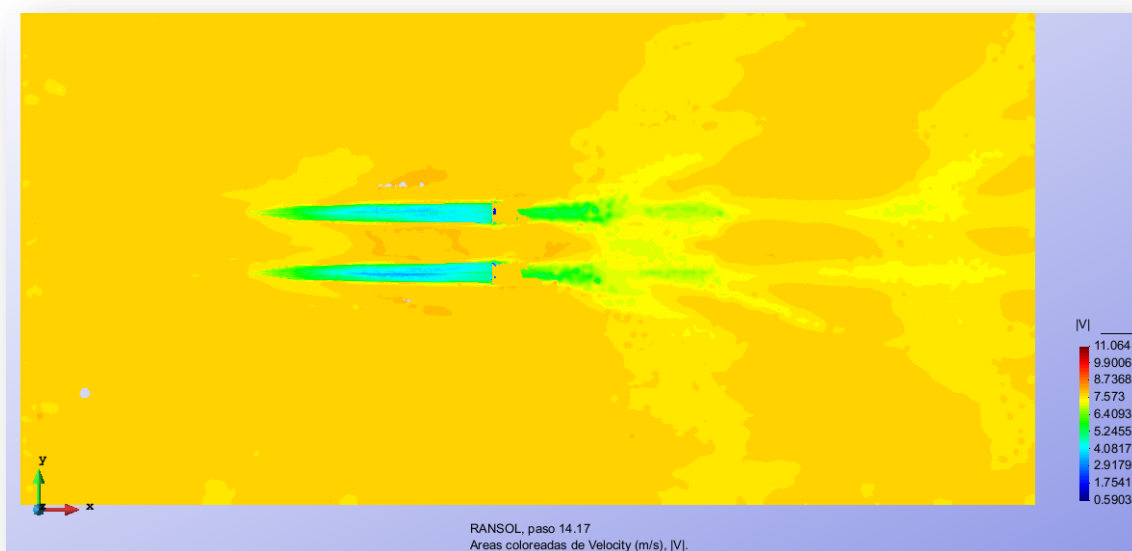


- 15 Nudos

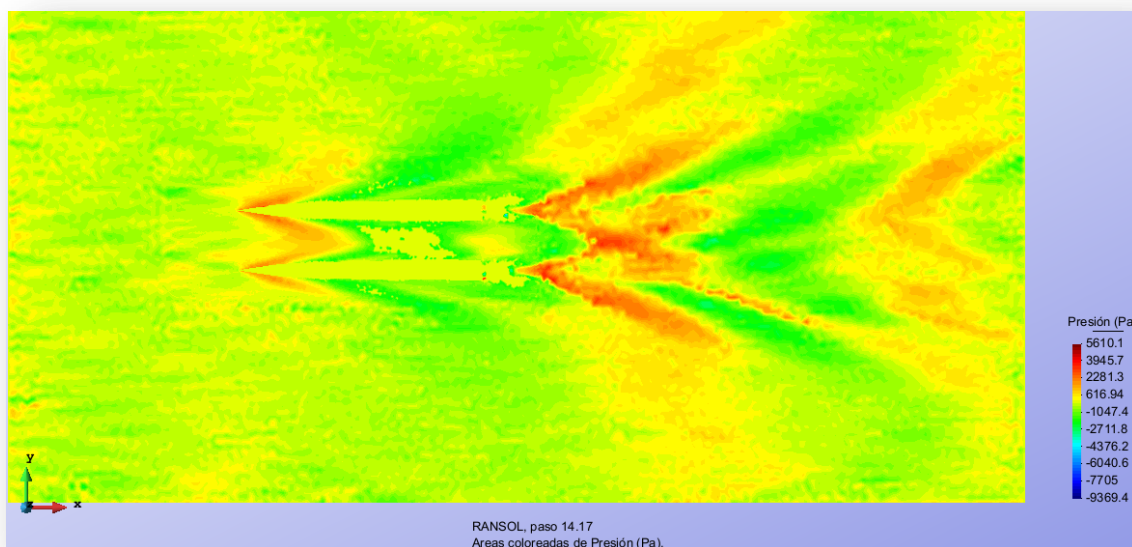
-Deformación de superficie libre



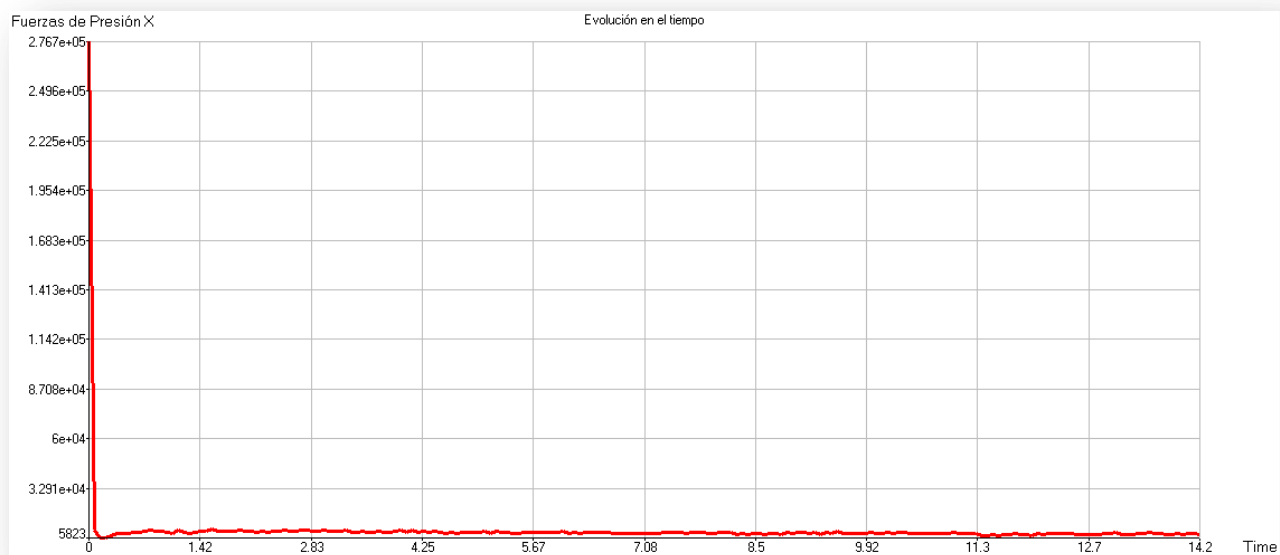
-Campo de velocidades

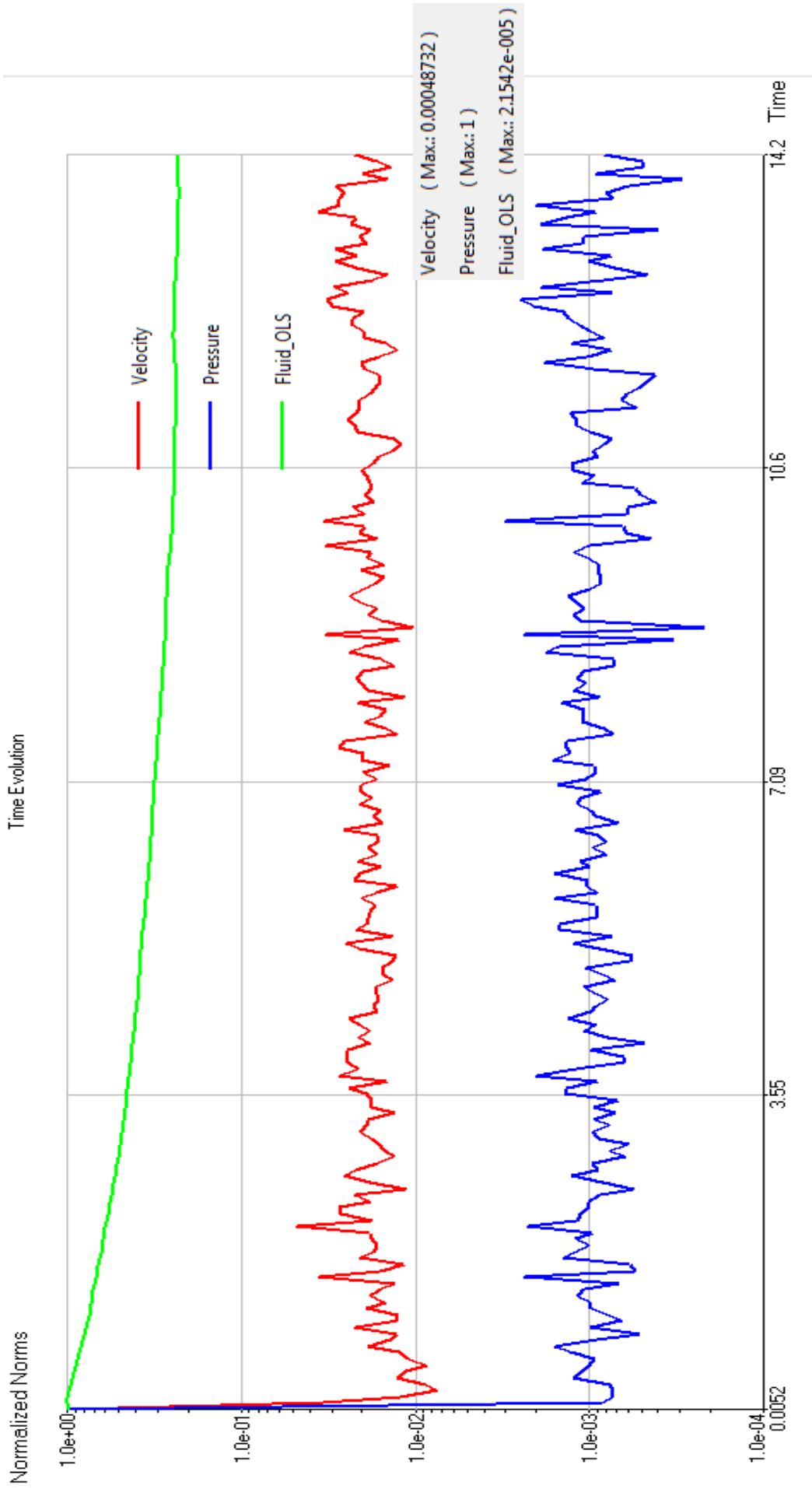


-Campo de presiones



-Gráfico de fuerzas







-Fuerzas de contorno

```
T3_Wall/Bodies Autol: (Paso final 14.1648)
Fuerzas de Presión (PFx PFy PFz)
  7700.6   -706.4   -73609
Momentos de Presión (PMx PMy PMz)
-7987.6  3.3123e+006  -14784
Fuerzas de Presión estática (SPx SPy SPz)
-1023.6   1839.3  4.8715e+005
Momentos de Presión estática (SMx SMy SMz)
  130.62  -2.0197e+007   64947
Fuerzas de Viscosidad (VFX VFY VFZ)
  7749   10.155  -129.14
Momentos de Viscosidad (VMx VMy VMz)
  18.948   651.95   208.08
Fuerzas Totales
  14426   1143  4.1341e+005
Momentos totales
-7838.1  -1.6884e+007   50371
```

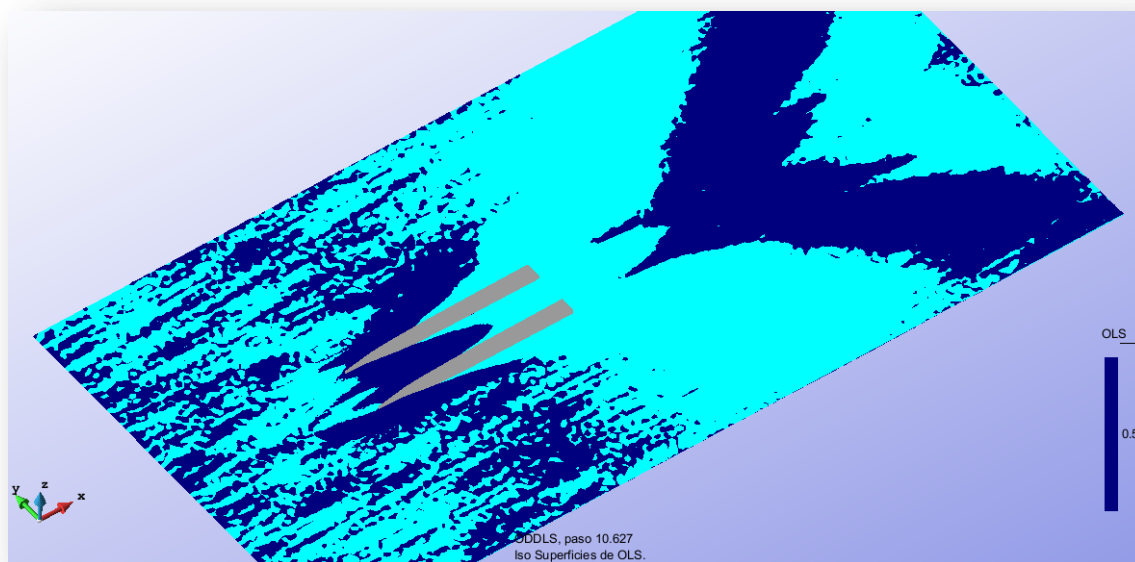
```
*****
*****
```

Nota:

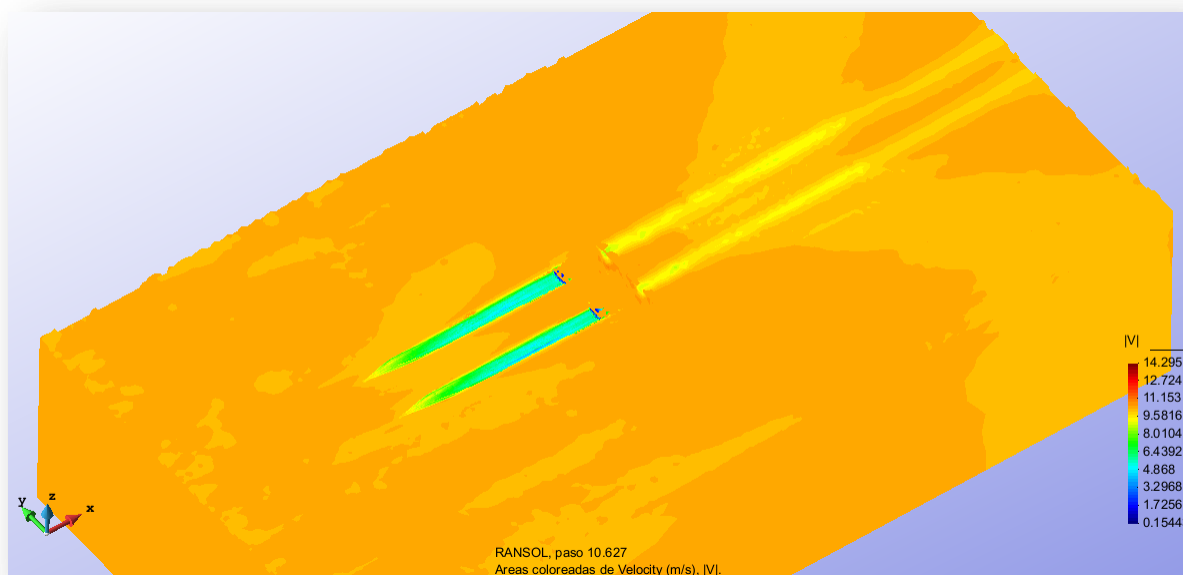
Las Fuerzas de Presión se calculan integrando la presión en la superficie
Las Fuerzas de Presión Estática se calculan integrando la presión estática en la superficie
Las Fuerzas de Viscosidad se calculan integrando las tensiones de viscosidad en la superficie
Los tres componentes cartesianos de fuerzas y momentos se dan en ambos casos
Las unidades son las unidades de salida definidas por el usuario

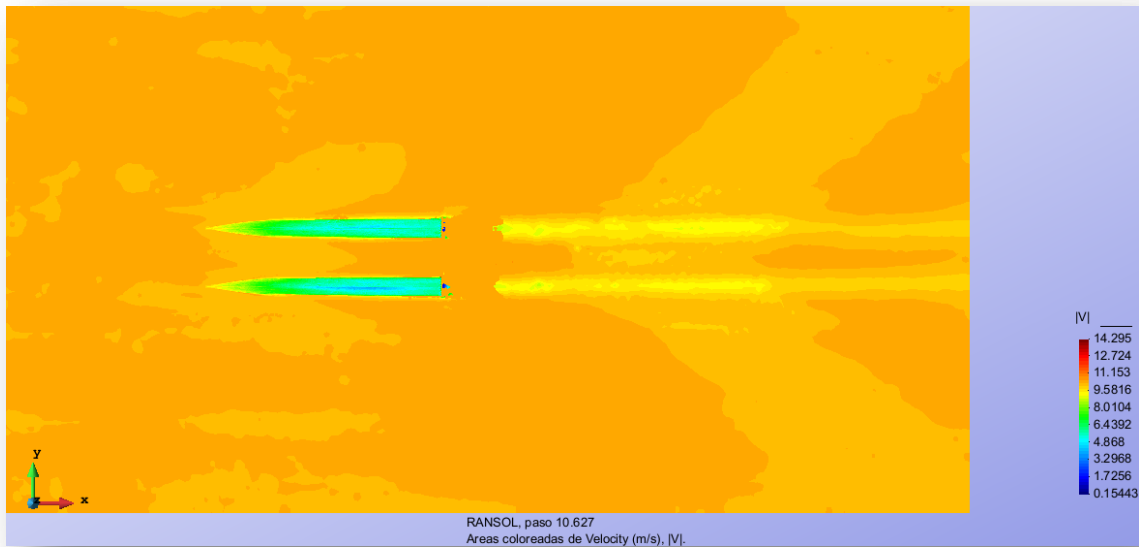
- 20 Nudos

-Deformación de superficie libre

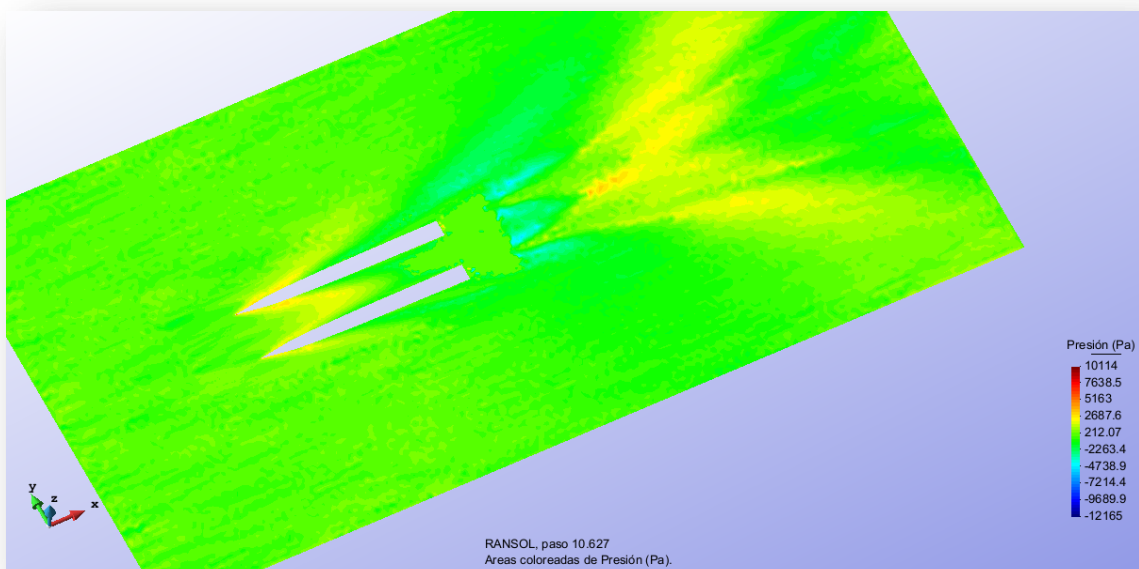


-Campo de velocidades

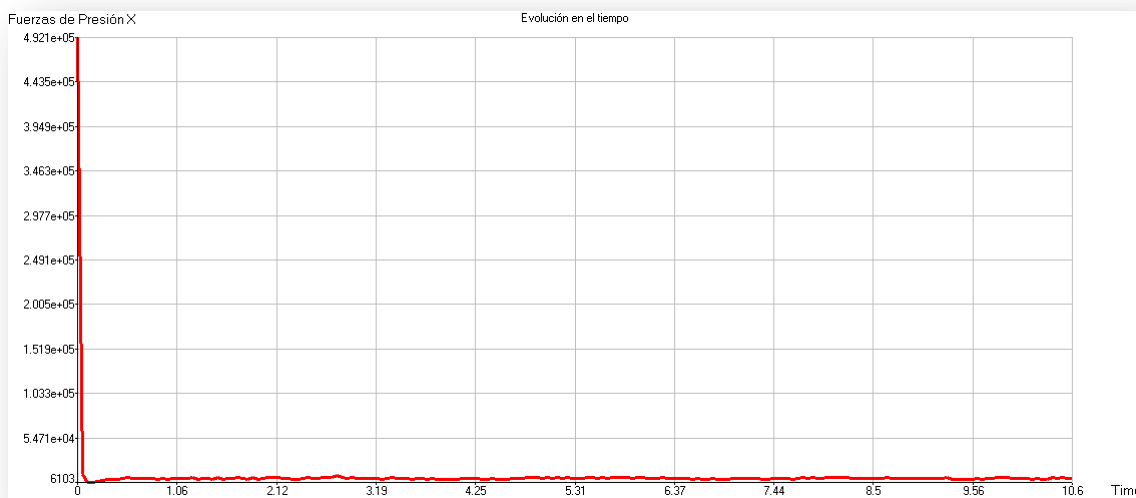




-Campo de presiones



-Grafico de fuerzas

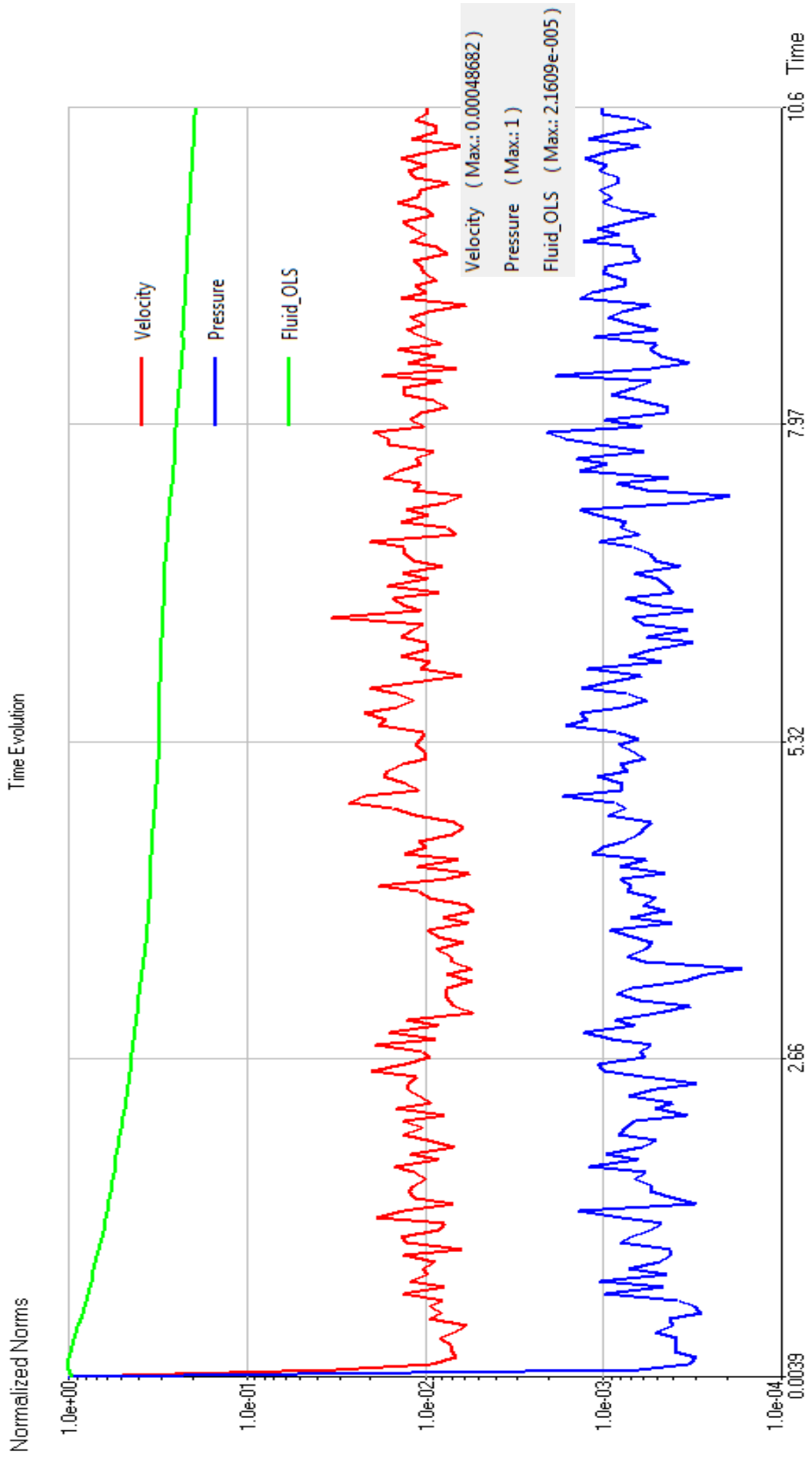


-Fuerzas de contorno

```

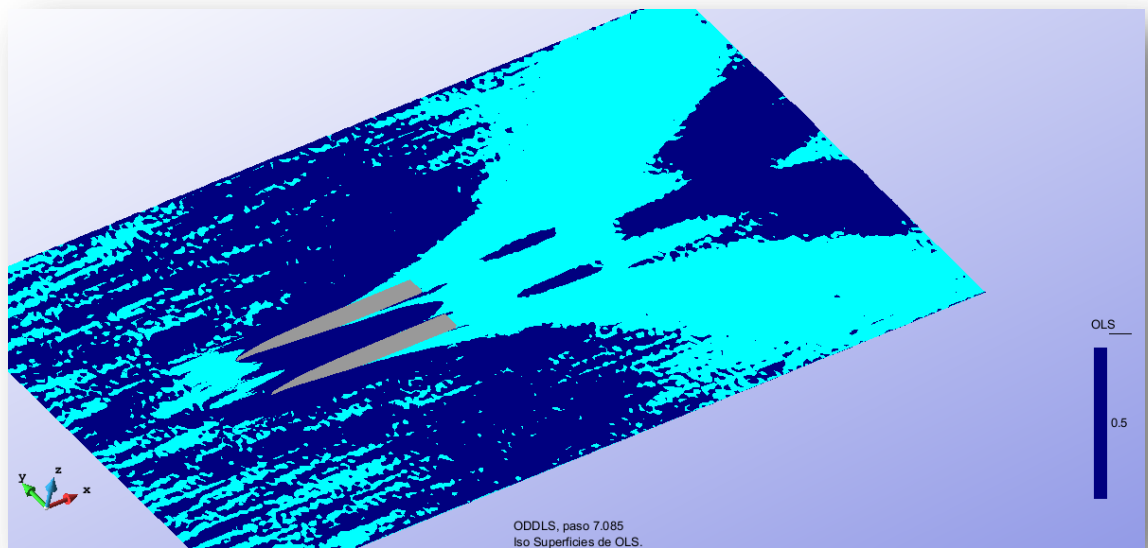
Fuerzas en contorno
T3_Wall/Bodies Auto1: (Paso final 10.6236)
Fuerzas de Presión (PFx PFy PFz)
 10276   283.49  -31586
Momentos de Presión (PMx PMy PMz)
 10588  1.7179e+006  -10630
Fuerzas de Presión estática (SPx SPy SPz)
 -1612.3  -918.9  4.8866e+005
Momentos de Presión estática (SMx SMy SMz)
 3066.2  -2.0242e+007  -26207
Fuerzas de Viscosidad (VFX VFY VFZ)
 13443  -26.463  -250.41
Momentos de Viscosidad (VMx VMY VMz)
 20.212  3487.9  -2025.4
Fuerzas Totales
 22107  -661.87  4.5682e+005
Momentos totales
 13675  -1.8521e+007  -38862
*****
*****
Nota:
  Las Fuerzas de Presión se calculan integrando la presión en la superficie
  Las Fuerzas de Presión Estática se calculan integrando la presión estática en la superficie
  Las Fuerzas de Viscosidad se calculan integrando las tensiones de viscosidad en la superficie
  Los tres componentes cartesianos de fuerzas y momentos se dan en ambos casos
  Las unidades son las unidades de salida definidas por el usuario
  
```

[Cerrar]

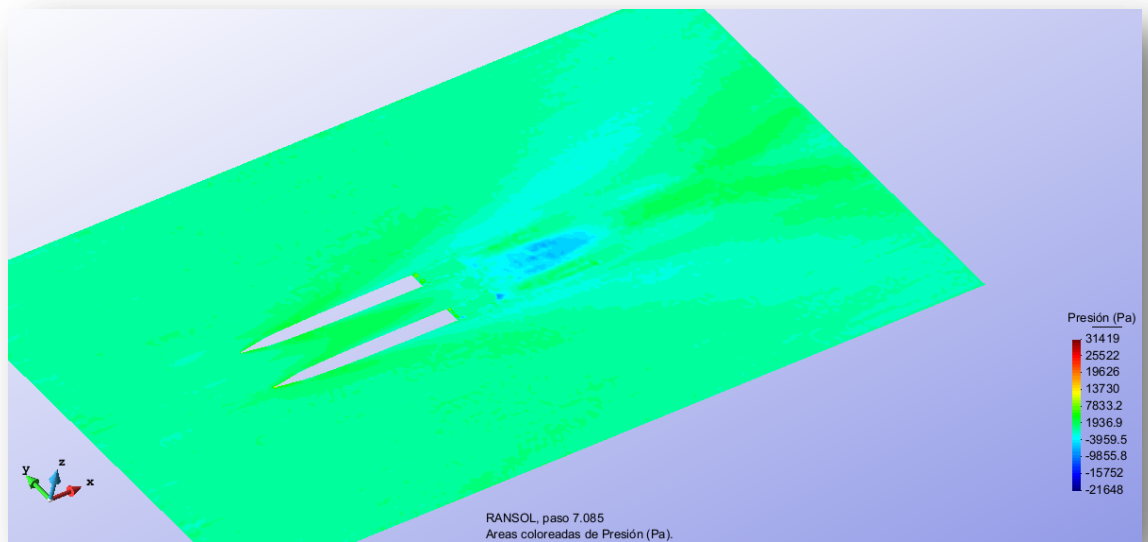


- 30 Nudos

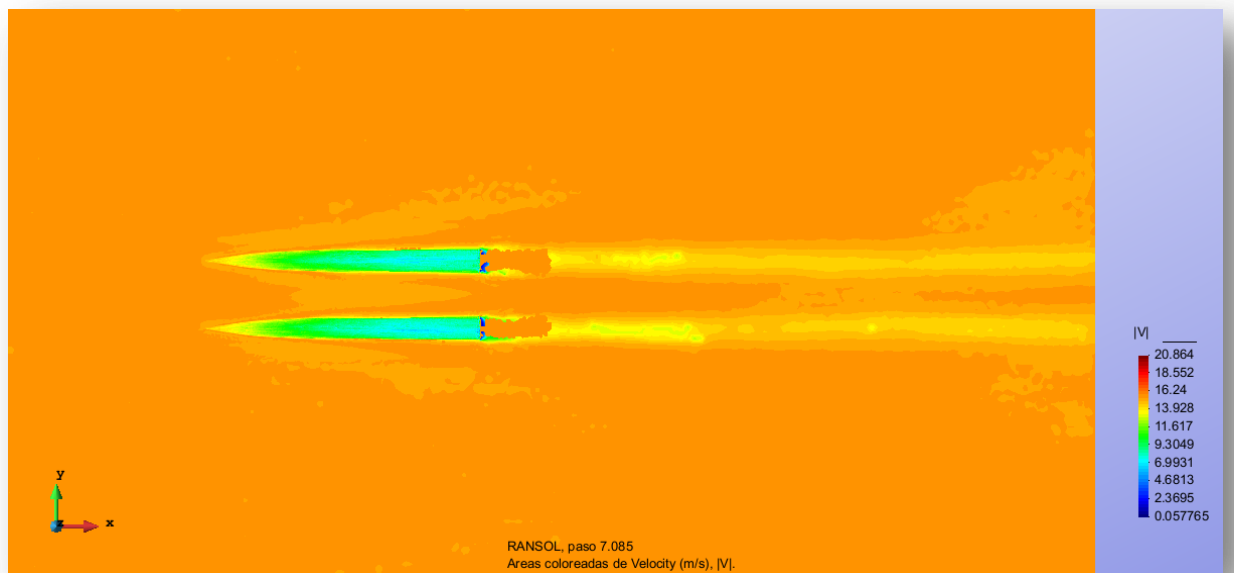
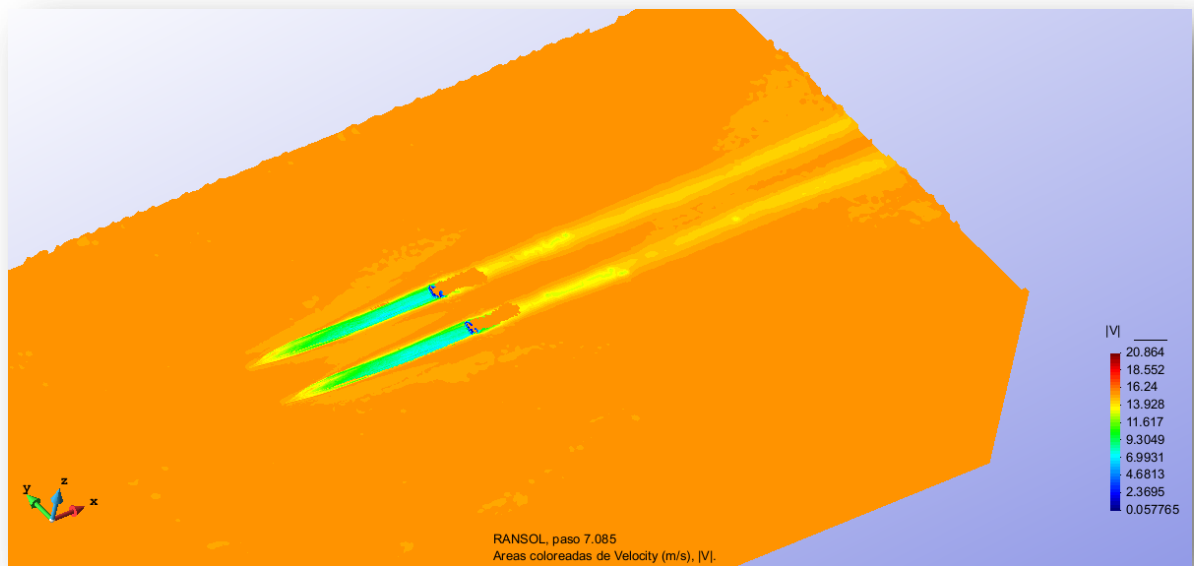
-Deformación de superficie libre



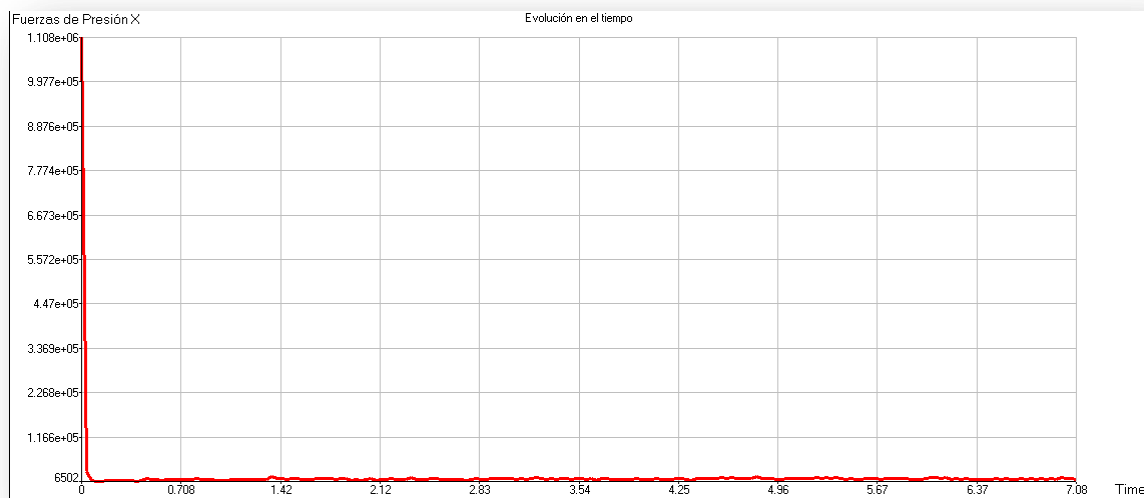
-Campo de presiones

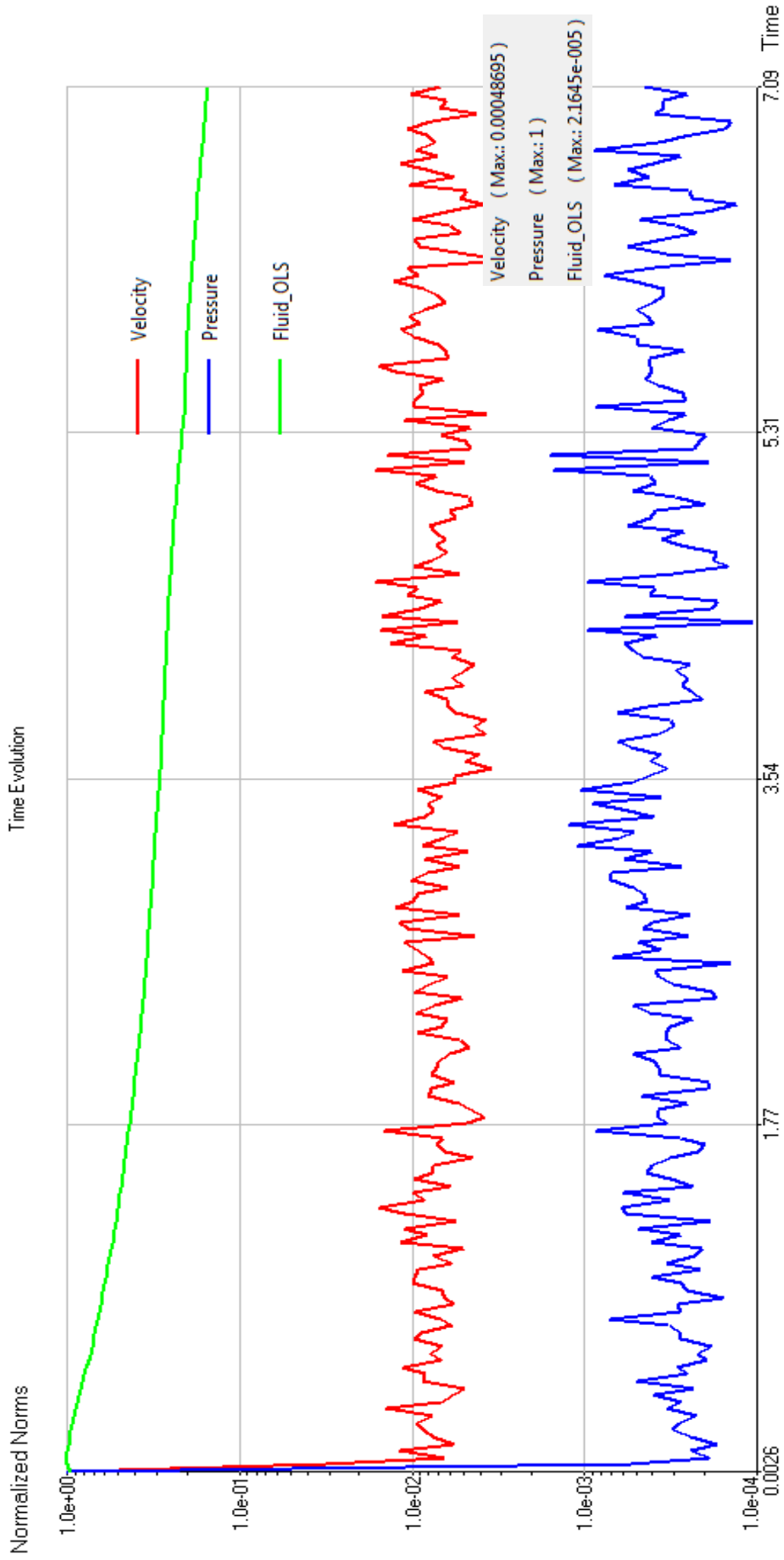


-Campo de velocidades



-Gráfico de fuerzas







-Fuerzas de contorno

```
T3_Wall/Bodies Autol: (Paso final 7.0824)
Fuerzas de Presión (PFx PFy PFz)
 12596   2595.5   43973
Momentos de Presión (PMx PMy PMz)
 29614 -1.8616e+006   80079
Fuerzas de Presión estática (SPx SPy SPz)
-2988.5   250.15  4.9786e+005
Momentos de Presión estática (SMx SMy SMz)
-266.09 -2.0531e+007   13890
Fuerzas de Viscosidad (VFx VFy VFz)
 31738   -1.3693   -289.63
Momentos de Viscosidad (VMx VMy VMz)
 269.21   125.82   -2183.7
Fuerzas Totales
 41345   2844.3  5.4154e+005
Momentos totales
 29617 -2.2393e+007   91785
```

```
*****
*****
```

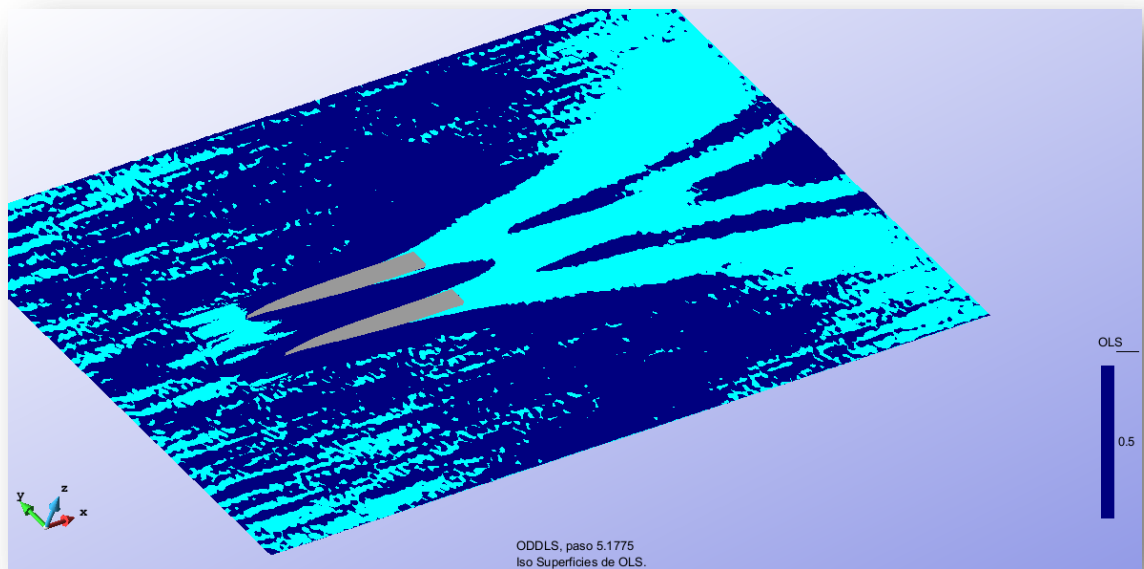
Nota:

Las Fuerzas de Presión se calculan integrando la presión en la superficie
La Fuerzas de Presión Estática se calculan integrando la presión estática en la superficie
Las Fuerzas de Viscosidad se calculan integrando las tensiones de viscosidad en la superficie
Los tres componentes cartesianos de fuerzas y momentos se dan en ambos casos
Las unidades son las unidades de salida definidas por el usuario

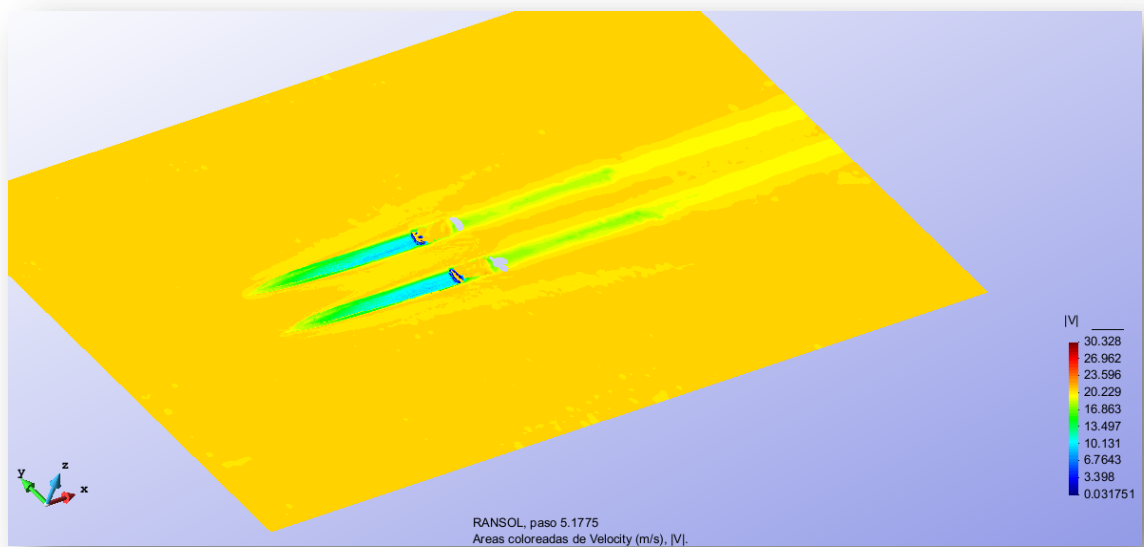
Cerrar

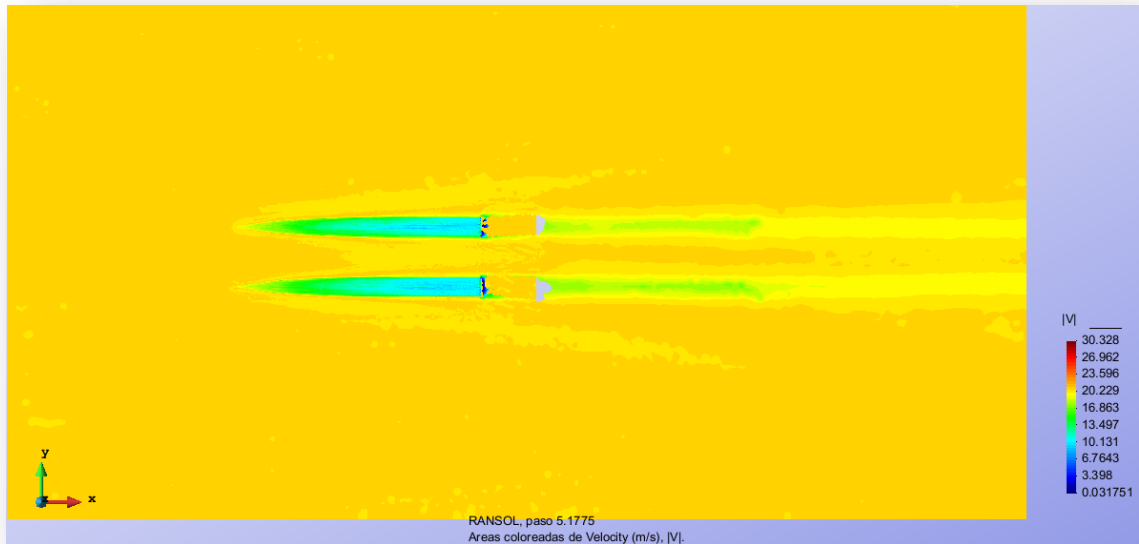
- 40 Nudos

-Deformación de superficie libre

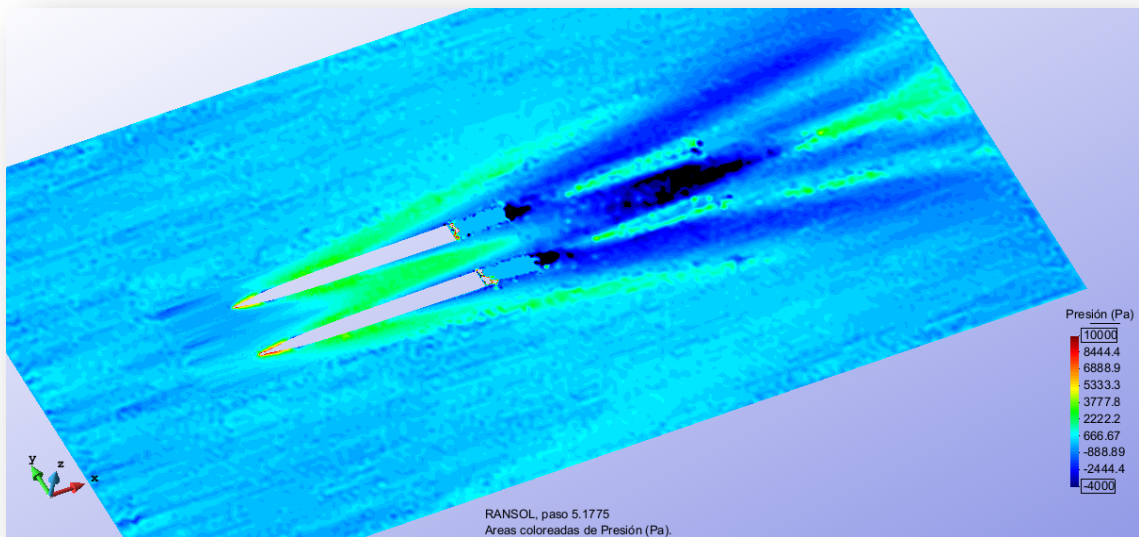


-Campo de velocidades

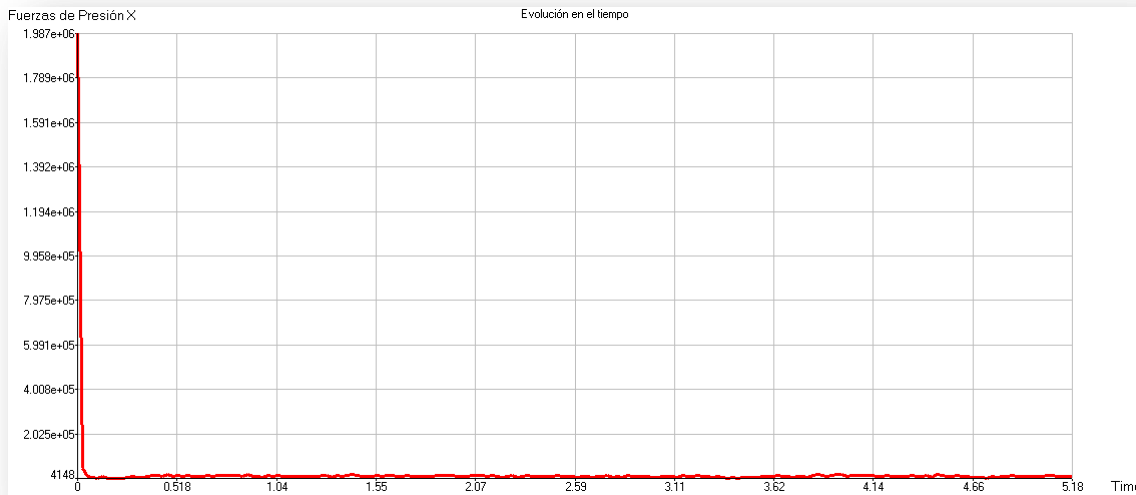




-Campo de presiones



-Gráfico de fuerzas

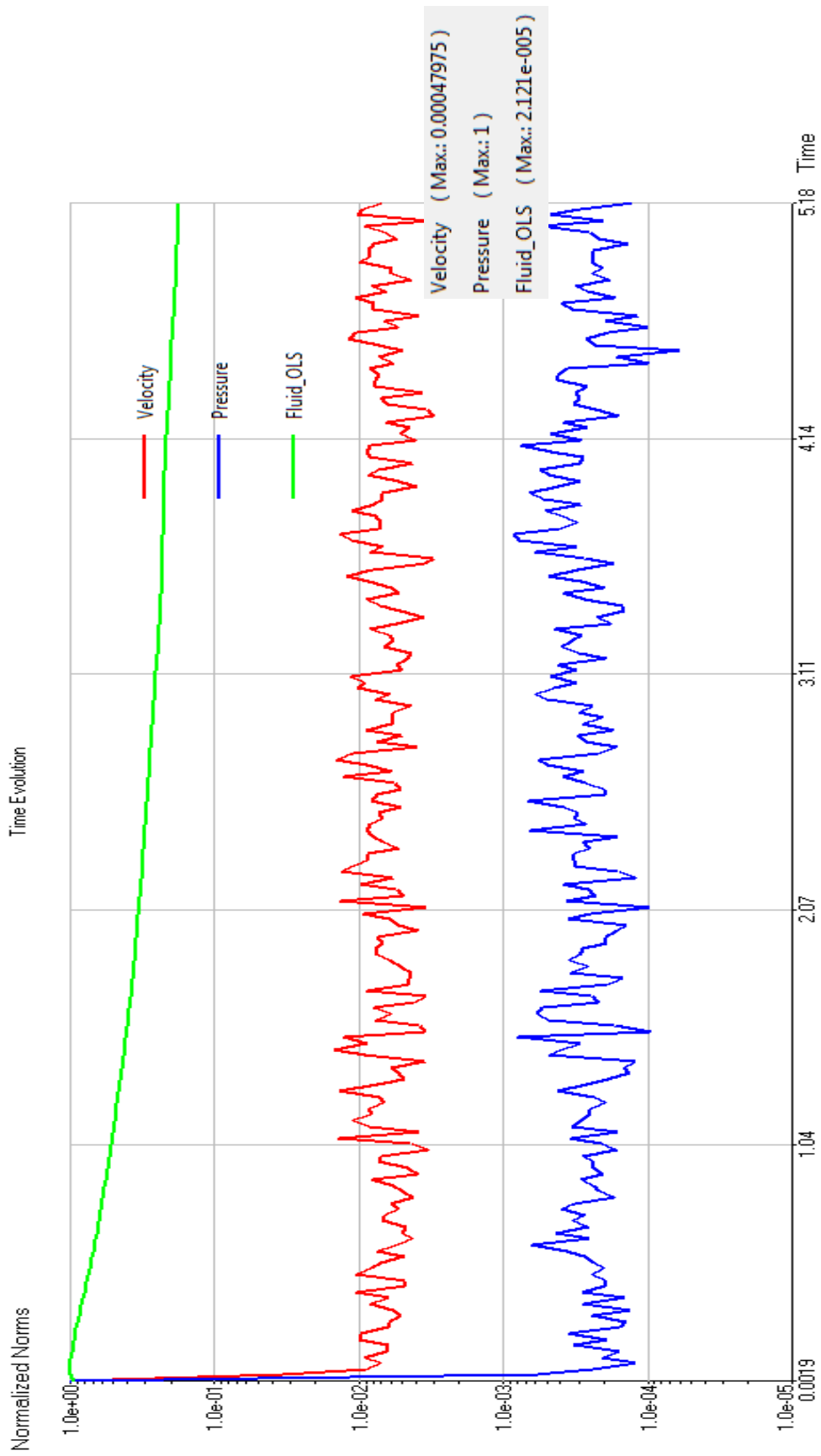


-Fuerzas de contorno

```

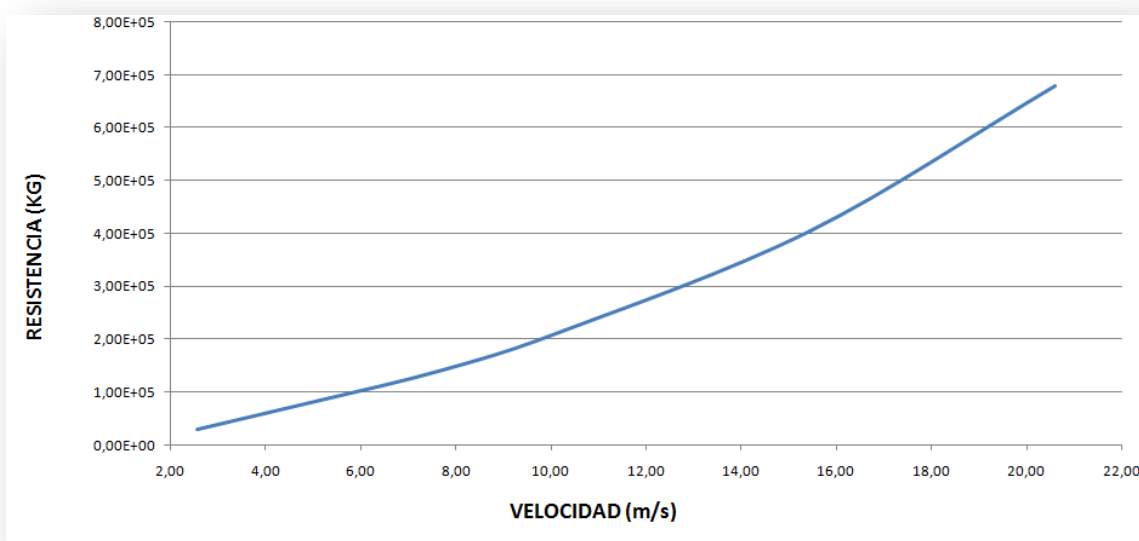
T3_Wall/Bodies Auto1: (Paso final 5.1756)
Fuerzas de Presión (PFx PFy PFz)
 14960  1341.2  40528
Momentos de Presión (PMx PMy PMz)
 24398  -1.8514e+006  27662
Fuerzas de Presión estática (SPx SPy SPz)
 -3213  446.17  5.0186e+005
Momentos de Presión estática (SMx SMy SMz)
 1875.7  -2.0663e+007  19107
Fuerzas de Viscosidad (VFx VFy VFz)
 57632  23.189  -388.15
Momentos de Viscosidad (VMx VMy VMz)
 397.24  -858.39  -1659.8
Fuerzas Totales
 69378  1810.6  5.42e+005
Momentos totales
 26671  -2.2515e+007  45110
*****
*****
Nota:
  Las Fuerzas de Presión se calculan integrando la presión en la superficie
  La Fuerzas de Presión Estática se calculan integrando la presión estática en la superficie
  Las Fuerzas de Viscosidad se calculan integrando las tensiones de viscosidad en la superficie
  Los tres componentes cartesianos de fuerzas y momentos se dan en ambos casos
  Las unidades son las unidades de salida definidas por el usuario
  
```

Cerrar

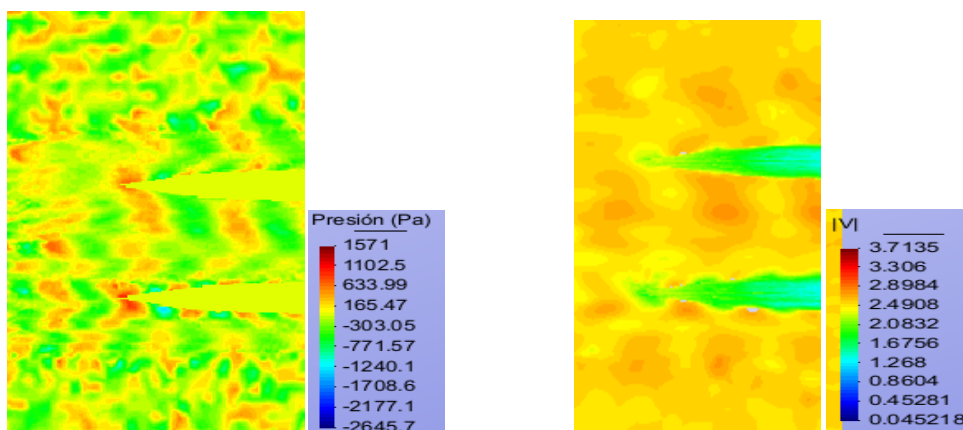


Una vez visualizados los resultados de presión, velocidad, deformación de superficie libre... Se comentarán los resultados obtenidos y se hallará la curva resistencia-velocidad, la cual se hallará mediante Excel.

Los resultados de la resistencia son los obtenidos en las fuerzas de contorno, las fuerzas totales a lo largo del eje X. Estos resultados están en Newton, así para representarlos se convertirán a kilogramos.



Si se compara la velocidad y presión se puede apreciar claramente que se cumple el teorema de Bernoulli, el cual dice que a altas velocidades la presión es baja y viceversa como se puede ver a continuación.



La zona de proa es en la que más claramente se aprecia este fenómeno. A la izquierda es el campo de presiones y a la derecha el de velocidades. La zona de color rojo es la que señala altas presiones y la zona verde la que señala las bajas velocidades.

Además comparando los gráficos de fuerzas de presión para cada velocidad se aprecia como para este modelo la navegación a altas velocidades será más estable que a bajas. En los gráficos se aprecia que una vez se ha estabilizado la navegación a 5 y 40 nudos la curva de presión que sigue para 40 nudos es mucho más uniforme que para 5 nudos.

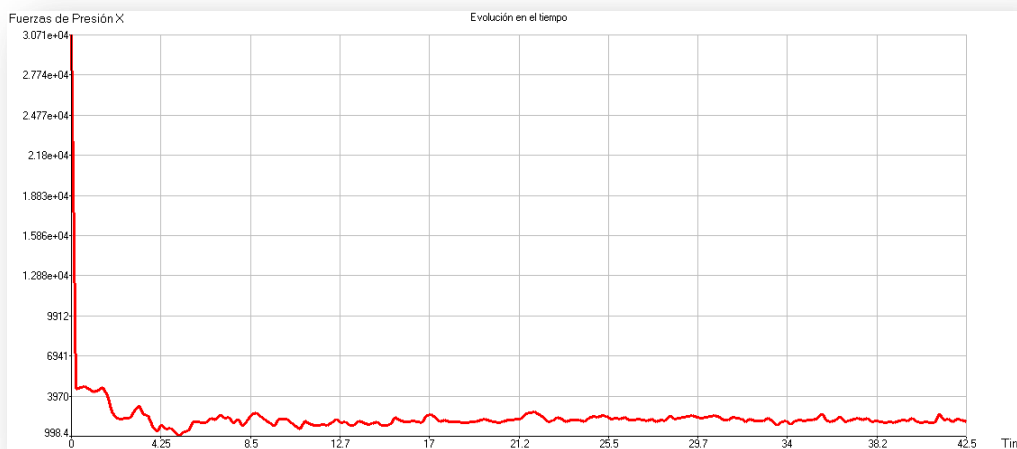


Gráfico de presiones 5 nudos

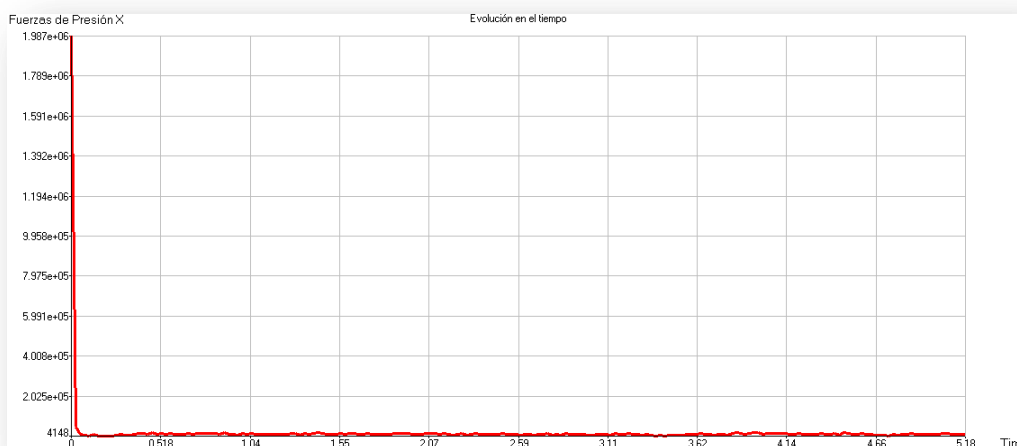
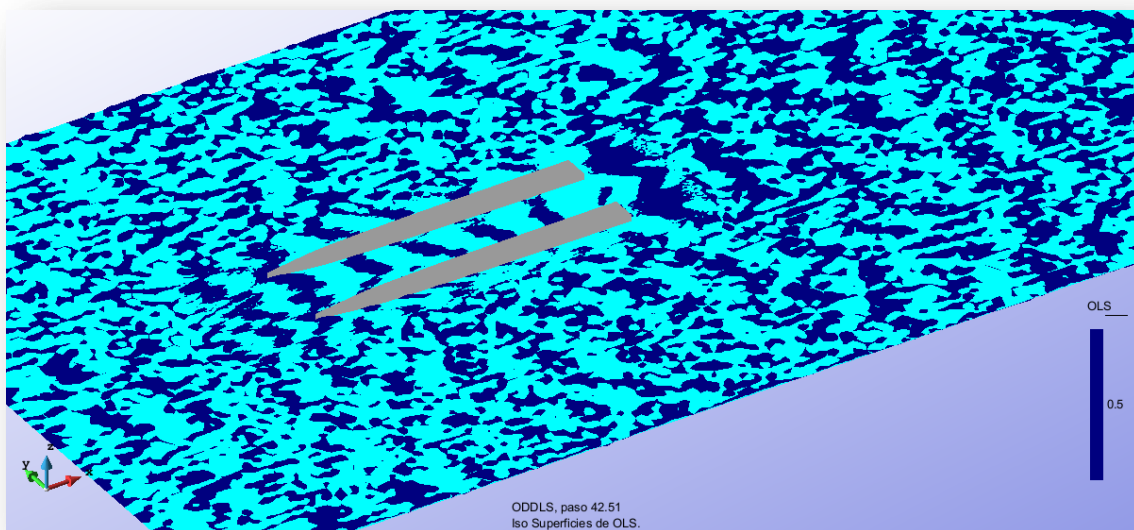
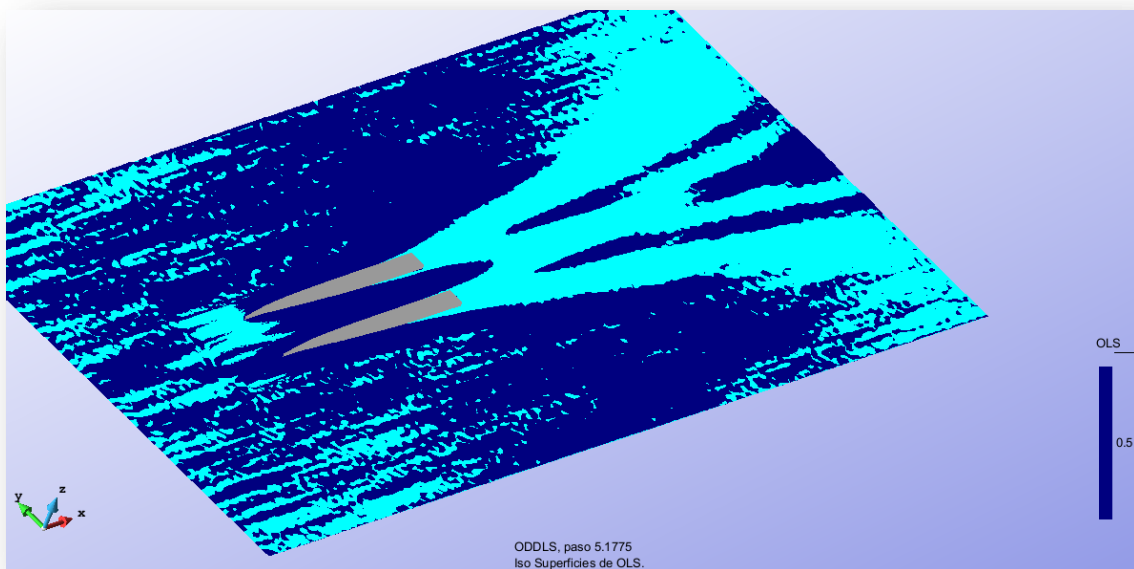


Gráfico de presiones 40 nudos

Esto último también se puede contrastar mediante la deformación de superficie libre. Dicha deformación es mucho más uniforme a 40 nudos que a 5 nudos, tal y como se aprecia en las fotos tomadas de los resultados.



Deformación superficie libre 5 nudos



Deformación superficie libre 40 nudos



7. CONCLUSIONES

Hasta ahora la calidad de un programa CFD queda demostrada a través de una validación con datos principalmente experimentales (los sacados de los canales de experiencias), tal y como ya se comentó anteriormente ya que estos programas se pueden definir como “nuevos” y están en continuo desarrollo para en un futuro no muy lejano poder eliminar la técnica tan engorrosa de crear un modelo a escala y poder sacar el estudio hidrodinámico en unos simples pasos y en mucho menos tiempo. Simplemente los CFD ahora sirven de ayuda y para completar un estudio hidrodinámico.

Las conclusiones que se pueden sacar de este proyecto realizado con el casco de un catamarán es que navegará mejor a altas velocidades que a bajas, tal y como se puede apreciar en la deformación de la superficie libre, la cual será mucho más uniforme a una velocidad de 40 nudos que a la de 5 nudos.

También observando el gráfico de normas con el paso del tiempo se aprecia como a 5 nudos la velocidad y presión tienen valores más distantes que por ejemplo comparándolo con el estudio hecho a 40 nudos, en el cual las curvas de presión y velocidad son más estables y tiene valores más conjuntos.

Cabe comentar que como para este modelo se ha generado un doble volumen de control y se ha mallado muy fino para optimizar e intentar obtener unos resultados lo más fiables y reales posible los tiempos de cálculo del programa han sido muy elevados, en torno 10-15 horas, debido a la potencia del programa y la complejidad de los cálculos. Este tiempo de cálculo se podría haber disminuido creando una malla más gruesa, pero entonces los resultados se desvirtuarían demasiado de la realidad. Por ello, tras todo este proyecto se ha observado que el mallado fino y doble volumen de control creado es de vital importancia cuando se necesitan resultados fiables.

En este proyecto se ha hecho correr el programa para un casco predefinido a diferentes velocidades y se ha creado la curva resistencia-velocidad, la cual se aprecia que tiene una curvatura suave y prolongada, lo que significa que el casco es uniforme y se comporta bastante bien en navegación a diferentes velocidades.



Mediante las fuerzas de contorno halladas para cada caso se pueden comparar cada fuerza, presión, momento, de cualquier eje del casco a cada velocidad, que se descompondrán en:

- **Coordenada X:** se refiere a la resistencia de avance.
- **Coordenada Y:** se contrarresta con la mitad del barco.
- **Coordenada Z:** es la de empuje y se contrarresta con el peso del barco.

Como conclusión general, a lo largo de este proyecto se ha podido verificar que el casco del catamarán estudiado tiene unas formas óptimas y tiene un comportamiento bastante bueno en navegación a diferentes velocidades.

Con los resultados que se pueden obtener en este tipo de programas se pueden acoplar bulbos o cambiar las formas del casco para observar el cambio de presión, velocidades, líneas de agua, resistencia que ejerce el casco en cada caso y así conocer si es posible algún tipo de optimización y saber cómo hacerla.

Solo queda comentar que este tipo de programas pueden hacer cálculos muy complejos y son muy potentes a la hora de hacer estudios hidrodinámicos entre otros cálculos que son posibles de realizar. Por ello están a la orden del día en cualquier nueva construcción o reparación del casco de un barco hablando dentro del campo Naval.

Así, con este proyecto se ha tratado de dar una visión general en torno al complicado mundo de la hidrodinámica naval. A pesar de que los resultados desde el punto de vista experimental no son del todo buenos, en un futuro pueden servir de ayuda desde el punto de vista académico a futuros usuarios de CFD's como Tdyn.



8. BIBLIOGRAFÍA

- COMPASS INGENIERÍA Y SISTEMAS. Tutorial de Tdyn. Tdyn, Barcelona 2009.
- COMPASS INGENIERÍA Y SISTEMAS. Descripción teórica de Tdyn. Tdyn, Barcelona 2009.
- COMPASS INGENIERÍA Y SISTEMAS. Manual de referencia Tdyn. Tdyn, Barcelona 2009.
- COMPASS INGENIERÍA Y SISTEMAS. Manual introducción de turbulencia. Tdyn, Barcelona 2009.
- COMPASS INGENIERÍA Y SISTEMAS. Especificaciones técnicas de Tdyn. Tdyn, Barcelona 2009.
- Ws Atkins Consultants and members of the NSC. Marine applications of computational fluid dynamics.
- VOLKER Bertram (2000). Practical ship hydrodynamics.
- SALAS, LUCO, SAHOO, BROWNE, LOPEZ (2003). Experimental and CFD resistance calculation of a small fast catamaran.
- BÜLENT DANISMAN, GÖREN Omer, INSEL Mustafa, ATLAR Mehmet. An optimization study for the bow form of high speed displacement catamarans.
- DUDSON Ed, HARRIES Stefan (June 2005). Hydrodynamics fine-tuning of a pentamaran for high-speed sea transportation services. International Conference on Fast Sea Transportation, St.Petersburg, Russia



9. PÁGINAS WEB DE INTERÉS

- WWW.COMPASSIS.COM (Página de programa Tdyn)
- WWW.WIKIPEDIA.COM (Información variada)
- WWW.MONOGRAFIAS.COM/MECANICADEFUIDOS (Información fluidos)
- HTTP://CANAL.ETSIN.UPM.ES/ (Artículos sobre CFD)