



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

REDUCTOR DE ARRASTRE BIOINSPIRADO PARA EMBARCACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DAVID IGNACIO ARMIJO VILLANUEVA

PROFESOR GUÍA

BRUNO GROSSI CÓRDOVA

MIEMBROS DE LA COMISION

WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ
RUBEN FERNANDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico
POR: David Ignacio Armijo Villanueva
FECHA: 2018
PROFESOR GUÍA: Bruno Grossi

REDUCTOR DE ARRASTRE BIOINSPIRADO PARA EMBARCACIONES

Este estudio es inspirado en el Pingüino Emperador (*Aptenodytes Fosteri*) quien es capaz de almacenar burbujas alrededor de su cuerpo y liberarlas para para aumentar drásticamente la velocidad de nado, y así salir eyectado desde el agua a la superficie. Este fenómeno es conocido como lubricación con aire, el cual permite al pingüino reducir momentáneamente el arrastre ejercido por el medio acuoso. Se estudia el fenómeno de lubricación con aire para cuerpos sólidos sumergidos en agua en movimiento.

El objetivo principal es cuantificar el efecto de inyectar aire continuamente a la obra viva de un barco en movimiento, para ello. Se utilizan simuladores CFD para evaluar dinámicamente un barco navegando a 10 velocidades diferentes, analizar las fuerzas de arrastre ejercidas por el medio y repetir la experiencia en presencia con un inyector de aire continuo en la proa. Comparar los resultados obtenidos para concluir si el efecto de lubricación con aire provoca alguna reducción del costo de transporte necesario para mantener navegando a velocidad constante del modelo mediante simulaciones.

Los modelos consisten en la simulación de un corte horizontal de la obra viva de un barco que se mueve a esa velocidad constante, con el fin de estudiar las fuerzas de reacción de las paredes del modelo, siendo estas de igual magnitud que las fuerzas de arrastre ejercidas por el fluido. Se espera que esta fuerza de reacción de las paredes sea menor en presencia de lubricación con aire.

La validación se realiza mediante dos etapas, la primera es verificando que los resultados obtenidos sean independientes del tamaño del volumen de control, finesa del mallado y tiempo de simulación. Esto se logra mediante varias simulaciones que permiten ver que la diferencia entre resultados no supera el 5%. La segunda etapa de validación consiste en evaluar dos aproximaciones con fundamento bibliográfico que permiten estimar preliminarmente los resultados. Se considera que los modelos son válidos cuando los resultados obtenidos en la simulación se encuentran dentro de los márgenes teóricos impuestos.

De los modelos estudiados se observa que en presencia de inyección de aire se genera un efecto Magnus, el cual hace que el fluido aumente su velocidad parcialmente al rodear las burbujas. Este aumento de velocidad trae consigo una disminución en el grosor de la capa límite y aumento parcial de los esfuerzos que se concentran en las paredes que no están cubiertas por aire, sin embargo esto se compensa debido a que las secciones cubiertas con burbujas reducen drásticamente la fuerza de reacción en dicha zona. Se obtiene como resultado una disminución promedio de 19,3% en el costo de transporte de los modelos que presentan inyección de aire continua con respecto de los modelos que navegan sin lubricación con aire.

Dedicado a mi familia
Compañeros de Balonmano
Amigos de Bachillerato
Amigos de Ingeniería

Quienes de una u otra manera me han acompañado de esta etapa universitaria.

“Some people were born lucky.
Other people were lucky to be born.
I don't need luck, tough. I don't want it
I've always had to struggle and fight.
That's made me strong
It's made me who I am”.

Agradecimientos

En primera instancia agradecer a mis amigos de Bachillerato, con quienes viví la experiencia de enfrentar el mundo universitario y aprendimos lo que cuesta llegar a donde estamos ahora.

Agradecer también a la Selección de Balonmano que fueron una motivación muy grande para seguir luchando tanto en ámbitos académicos, como deportivamente, a no conformarme con lo que uno es actualmente sino que a siempre superarse.

Agradecer al Departamento de Ingeniería Mecánica por los espacios brindados tanto para desarrollarse como ingeniero, como para distenderse con los compañeros en asados y paseos.

Obviamente agradecer también a todos los amigos Mecánicos con los que trasnochamos incontables veces para superar las situaciones adversas de la vida estudiantil (muchas veces no lo logramos, pero incluso en las malas nos hicimos compañía y volvimos a intentarlo el semestre siguiente).

Agradecer a la Rama de Balonmano de la facultad cuyo sentimiento de equipo trascendió el ámbito estudiantil hasta formar parte de un club juntos y seguimos poniendo a prueba nuestros límites en instancias competitivas.

Agradecer a mis amigos futboleros de Chicha al Cuerno y mis amigos ñoños del colegio que siguen siendo parte importante de mi vida social y el ocio presente en mi vida.

Finalmente agradezco a mi familia por apoyarme en estos largos años de estudio y a mis tíos y primos por abrirme las puertas de su hogar aguantándome por más de 2 años permitiéndome llevar mi estilo de vida sin mayores objeciones.

Tabla de Contenido

Resumen.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos y Alcances.....	1
1.2.1 Objetivo General.....	1
1.2.2 Objetivos Específicos.....	1
1.3 Alcances y Limitaciones	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Antecedentes Generales.....	3
2.1.1 Pingüino Emperador y su mecanismo para reducir el arrastre	3
2.1.2 Estado del Arte del Comercio Marítimo	4
2.2 Antecedentes Técnicos	5
2.2.1 Caracterización del fluido	5
2.2.2 Resistencias en la navegación	7
2.3 Diseño de Barcos	8
2.4 Ecuaciones gobernantes.....	11
2.4.1 Fuerza de Arrastre:	11
2.4.2 Coeficiente de Arrastre:.....	11
2.4.3 Potencia del Barco o Fuerza del Barco.....	12
2.4.4 Numero de Reynolds	12
2.4.5 Numero de Froude	13
2.4.6 Velocidad de Inyección de Aire	13
2.4.7 Fuerza Tangencial debido al Esfuerzo de Corte	13
2.4.8 Fuerza Normal debido a la Presión	13
2.5 ANSYS (Fluid Flow)	14
3 METODOLOGIA.....	15
3.1 Definición del modelo.....	15
3.1.1 Estimaciones en base a modelos reales	15
3.1.2 Descripción del modelo hecho en ANSYS	17
3.1.3 Geometría del Modelo	17
3.1.4 Mallado.....	20

3.1.5	Configuraciones de Condiciones de Borde	24
3.2	Validación del modelo:.....	24
3.2.1	Validación del Mallado	24
3.2.2	Validación del Volumen de Control.....	25
3.2.3	Parametrización de los Modelos	26
3.2.4	Validación de Resultados.....	26
3.3	Definir parámetros de entrada.....	26
3.4	Recolectar datos analizar y comparar.....	26
4	RESULTADOS Y DISCUSION	28
4.1	Validación de los modelos SIA.....	28
4.1.1	Validación del mallado:.....	28
4.1.2	Validación del Volumen de Control:.....	28
4.1.3	Parametrización de la simulación	29
4.1.4	Validación de los resultados	29
4.2	Análisis Diagrama de Fases:.....	30
4.3	Análisis Capa Límite	35
4.4	Análisis de Esfuerzos.....	40
4.4.1	Debido a la Presión	40
4.4.2	Debido a esfuerzos tangenciales.....	42
4.4.3	Concentración de Esfuerzos Totales.....	44
4.5	Resumen de resultados obtenidos	48
4.5.1	Resultados Área Frontal.....	48
4.5.2	Resultado Sección Lateral	49
4.5.3	Resultado Área Trasera	51
4.5.4	Resultado Neto	53
5	CONCLUSIONES.....	54
6	BIBLIOGRAFÍA	56
7	ANEXOS	1
	Modelo 2 (Velocidad de movimiento 1,6 [m/s]).....	1
	Modelo 3 (Velocidad de movimiento 1,9 [m/s]).....	5
	Modelo 5 (Velocidad de movimiento 2,5 [m/s]).....	9
	Modelo 6 (Velocidad de movimiento 2,8 [m/s]).....	13
	Modelo 8 (Velocidad de movimiento 3,4 [m/s]).....	17
	Modelo 9 (Velocidad de movimiento 3,7 [m/s]).....	21

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Hoy en día el transporte marítimo es el más utilizado por el mercado industrial, esto se debe principalmente a que tiene una relación de costo por tonelada transportada inferior al de sus competencias (comercio aéreo y terrestre) (Guerrero, 2016), es por ello que surge la necesidad de estudiar maneras de optimizar este medio de transporte reduciendo el consumo de combustible por kilómetro transportado, con el fin de reducir costos monetarios y la contaminación al utilizar este medio de transporte.

Estudios sobre el nado de los pingüinos (Sphenisciformes) indican que puede reducir su costo de transporte por breves instantes. Esta singularidad la logran almacenando burbujas alrededor de su cuerpo y liberándolas para reducir la fricción entre el medio acuoso y su cuerpo. De esta forma reducen la fuerza de arrastre ejercida por el agua, permitiéndole aumentar su velocidad drásticamente para salir eyectado a la superficie.

En el presente documento se estudia el funcionamiento del mecanismo que permite al pingüino reducir la fuerza de arrastre mientras nada, para luego implementar dicho mecanismo en embarcaciones, con el fin de cuantificar su efecto mediante simulaciones computacionales (CFD). Finalmente se busca verificar si la presencia de burbujas ayuda a reducir la fuerza de arrastre que ejerce el agua sobre la obra viva de las embarcaciones.

1.2 Objetivos y Alcances

1.2.1 Objetivo General

Cuantificar la reducción de arrastre que produce una inyección continua de aire sobre la obra viva de un barco en movimiento, con el fin de verificar si este efecto permite reducir el costo de transporte del barco.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar cómo se comporta la capa límite en la obra viva de un barco, en presencia de inyección continua de aire.
- Realizar un análisis dinámico del barco en condiciones normales, y compararlas con el modelo con inyección de aire.
- Comparar distintos modelos de inyección de aire mediante simulaciones de ANSYS.
- Validar las simulaciones comparando resultados obtenidas con ANSYS y estimaciones obtenidas mediante fuentes bibliográficas.

1.3 Alcances y Limitaciones

- 1) Describir líneas de flujo de la capa límite en presencia de lubricación con burbujas y cálculo de coeficiente de arrastre.
- 2) Programar una simulación en ANSYS que permita agilizar el estudio del fenómeno.
- 3) Variables de trabajo:

- I. Dimensiones del modelo: 5,4 [m] de Eslora de flotación (Largo de la obra viva del barco), 2,3 [m] de Manga máxima de flotación (Ancho de la obra viva del barco).
 - II. Velocidades de operación del barco entre 2,5 y 7,8[nudos] (equivalente a 4,7 y 14,5 [km/h] respectivamente).
 - III. Tamaño sección de inyección de burbujas de 1[mm].
 - IV. Caracterización del flujo turbulento y subcrítico.
 - V. Análisis del modelo en estado estacionario a 0,5[m] de profundidad.
- 4) Concluir el efecto de la inyección de aire en base a los resultados de la simulación.

2. ANTECEDENTES

2.1 Antecedentes Generales

2.1.1 Pingüino Emperador y su mecanismo para reducir el arrastre

El Pingüino Emperador (*Aptenodytes Fosteri*) es capaz de almacenar burbujas entre sus plumas y liberarlas a su antojo. Cuando el pingüino entra al agua el aire atrapado entre sus plumas se comprime debido al aumento de presión del medio. Luego el pingüino realiza una pilo erección (eriza sus plumas) para liberar el aire comprimido alrededor de su cuerpo formando una capa de burbujas. Esta capa de burbujas le permite reducir drásticamente la fuerza de arrastre del medio mientras nada en el agua, permitiéndole así aumentar su velocidad de nado momentáneamente. A este mecanismo se denomina lubricación con aire, y el pingüino lo utiliza para acelerar rápidamente y salir eyectado del agua a la superficie (Jhon Davenport, Roger N. Hughes, Marc Shorten, Poul S. Larsen, 2011).



Ilustración 2.1: Pingüino recubriéndose con burbujas (*Jhon Davenport, Roger N. Hughes, Marc Shorten, Poul S. Larsen, 2011*).

En la Ilustración 2.1 se observa el pingüino recubriéndose de burbujas mientras se prepara para salir eyectado a la superficie.

Para accionar este mecanismo, el pingüino debe prepararse previamente de la siguiente manera:

1. **Almacenar aire entre sus plumas:** es un limitante dado que no puede almacenar aire estando bajo el agua, por lo que es un recurso que solo puede utilizar una vez por zambullida.
2. **Comprimir este aire:** Esta restricción obliga al pingüino a nadar a profundidades cercanas a los 20 metros bajo el nivel del mar para que la presión hidrostática del medio comprima el aire almacenado (reduce entre un 10 a 40% el volumen del aire almacenado).
3. **Liberar el aire comprimido:** el pingüino es capaz de erizar sus plumas a su antojo para liberar el aire comprimido y así cubrir su cuerpo de una capa de burbujas.

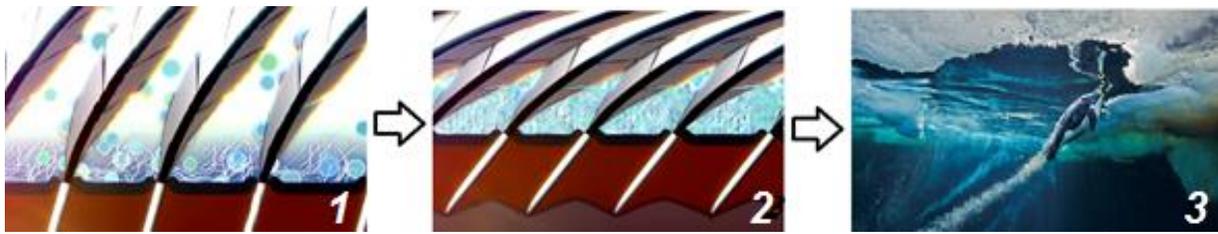


Ilustración 1.2: Secuencia del mecanismo de lubricación con aire (National Geographic, 2014)).

Para cuantificar el efecto de este mecanismo, se utiliza los resultados estudiados por (Jhon Davenport, Roger N. Hughes, Marc Shorten, Poul S. Larsen, 2011). En aquel documento se estima que el pingüino tiene un poder de propulsión entre 48W y 96W. En este estudio se considera un pingüino de 25[kg], cuya velocidad de nado promedio es de 5,3[m/s], un coeficiente de arrastre inicial de 0,02 (C_d), que la capa de aire recolectada es de 25mm (S_0) y que el área transversal del pingüino es de 0,6 [m²].

Tabla 1: Efectos del mecanismo en pingüinos (Jhon Davenport, Roger N. Hughes, Marc Shorten, Poul S. Larsen, 2011)).

Poder de Propulsión	Reducción de Arrastre Mínima Alcanzada	Reducción de Arrastre Máxima Alcanzada
48 W	54%	71%
96W	48%	66%

2.1.2 Estado del Arte del Comercio Marítimo

Hoy en día el transporte marítimo es el más utilizado por el comercio global, esto debido a que posee una relación de toneladas por kilómetro transportado más barato en comparación con el transporte terrestre y marítimo (Guerrero, 2016).

Debido a la demanda de este transporte, este medio aporta gran porcentaje de la producción mundial de CO₂, lo que provocó la intervención de la OMI (Organización Marítima Internacional) forzando a la industria a modificar la composición de los combustibles para reducir la emisión de gases tóxicos, es por ello que como norma se redujo el porcentaje de azufre. Sin embargo esta medida trajo consigo un aumento en el consumo de combustible debido al bajo rendimiento de los nuevos combustibles (Guerrero, 2016).

Por otra parte el aumento de consumo de combustible trae consigo un aumento en el costo económico del transporte, es por ello que surge la necesidad de reducir el consumo de combustible. La ingeniería marítima propone las siguientes alternativas para reducir el costo de transporte (Guerrero, 2016):

1. **Pinturas Hidrofobias:** capa de pintura que reduce la fricción entre la obra viva del barco y el agua.
2. **Cambios de Geometrías:** reduce el efecto de las olas en la obra viva del barco.

3. **Lubricación a base de aire:** inyección de burbujas en la obra viva del barco para reducir el arrastre.

Se profundiza el estudio de la tercera de estas alternativas puesto que es bio inspirado en el pingüino, y es una tecnología que puede ser implementada en otras industrias.

2.2 Antecedentes Técnicos

2.2.1 Caracterización del fluido

2.2.1.1 Capa Límite

Se denomina capa límite a la variación de velocidad que sufre un flujo de agua (o algún otro fluido) al rodear un cuerpo sólido. Este efecto se genera a que una delgada lámina de agua permanece pegada al sólido, y esta lámina arrastra a la siguiente lámina de agua y así hasta llegar a la velocidad de flujo normal, como se indica en la siguiente ilustración.

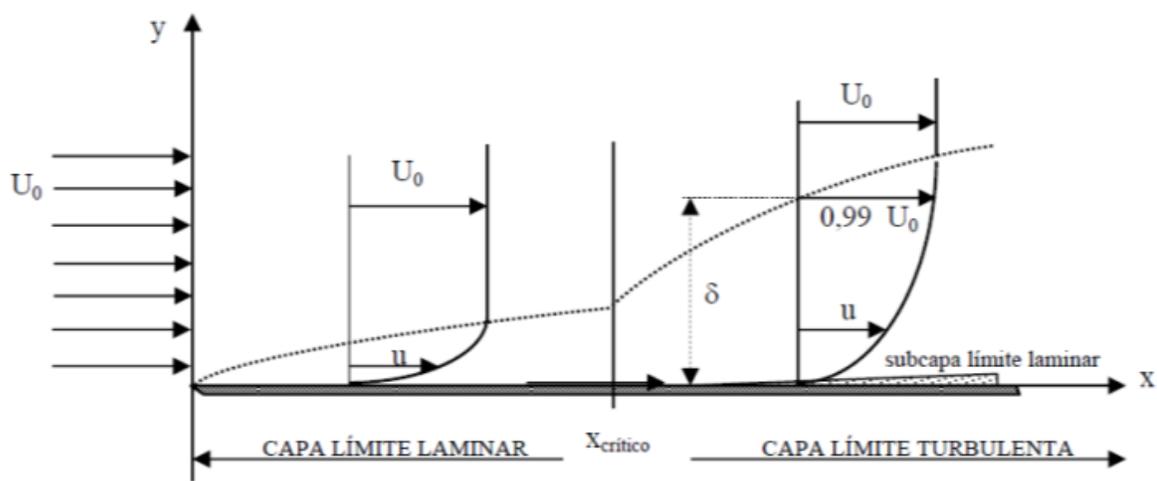


Ilustración 2.3: Comportamiento de capa limite (Murdock, 1993)

Como se ve en la Ilustración 2., hay un flujo que se mueve con velocidad U_0 , que luego de cruzar el borde de ataque (primera zona del cuerpo sólido en contacto con el agua), se forma un cambio de velocidad U que varía desde 0 a U_0 . La capa límite se acrecienta a lo largo del sólido llegando incluso a un régimen turbulento si sobrepasa el largo crítico ($X_{crítico}$). La capa límite se acaba cuando el fluido vuelve a la velocidad que llevaba en su curso natural (en este caso U_0). El largo crítico varía según las características del fluido (principalmente el régimen con el que viaja antes de toparse con el cuerpo sólido) y del sólido (geometría, tamaño y rugosidad) si el fluido tiene un carácter turbulento, el largo crítico se encuentra más cercano al borde de ataque.

A medida que crece la capa límite se produce mayor separación del fluido, lo que produce un aumento en el arrastre y consigo una pérdida de energía del medio de transporte. Existen varias estrategias para evitar este evento, sin embargo es de gran interés para este documento el Efecto Magnus para energizar la capa límite y así reducir el desprendimiento de la capa. Este efecto reduce considerablemente el arrastre generado y le permite al objeto (en este caso pelota de golf) sustentarse por más tiempo.

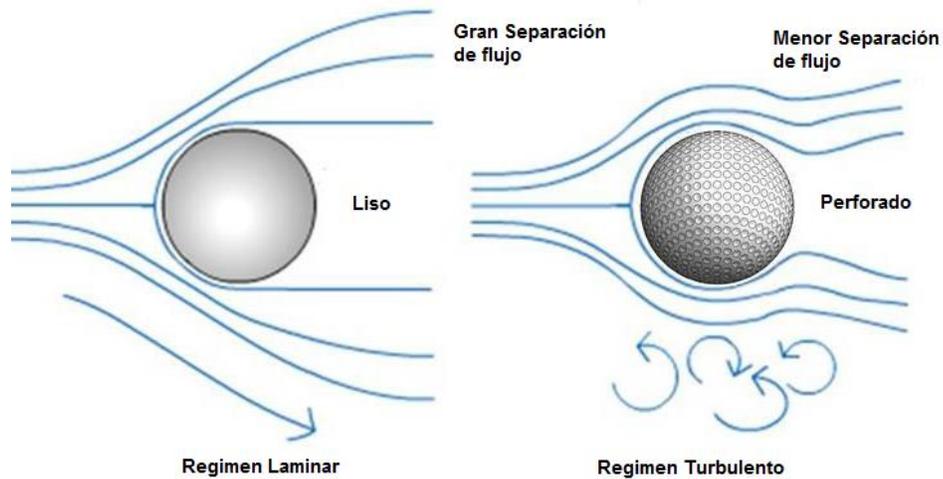


Ilustración 2.2: Efecto Magnus en la Pelota de Golf (Shabir Grover, 2017)).

Si bien este efecto es aerodinámico, tiene una particular relación con el trabajo hidrodinámico realizado en esta memoria, puesto que al obtener menor separación de flujo, se reduce la pérdida de presión en la sección trasera del cuerpo sólido, produciendo así un arrastre menor sobre el cuerpo.

2.2.1.2 Numero de Reynolds

Permite caracterizar el régimen de un flujo, este régimen puede ser de carácter laminar o turbulento dependiendo de la magnitud del número de Reynolds. La transición entre laminar y turbulento depende del ambiente en el que se encuentra el flujo (si pasa por un tubo, atravesando un cuerpo, en un canal abierto, etc.). Es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales de un fluido con las fuerzas viscosas del mismo.

Para estudiar el caso de canales abiertos:

- **Régimen Laminar ($Re < 5000$):** El fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula de fluido sigue una trayectoria lineal.
- **Régimen Turbulento ($Re > 5000$):** El flujo se mueve de forma caótica, las trayectorias de las partículas describen remolinos periódicos descoordinados.

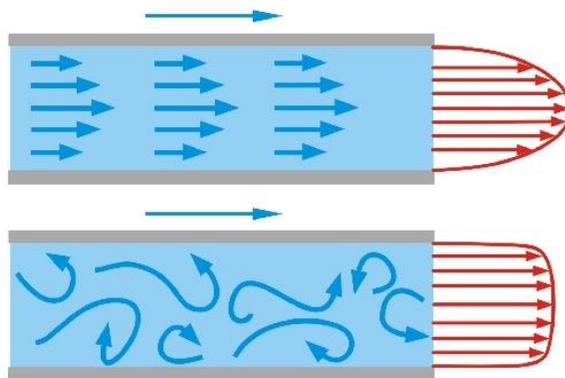


Ilustración 2.3: Diferencia gráfica entre régimen laminar (imagen superior) y turbulento (imagen inferior)

2.2.1.3 Numero de Froude

Es un numero adimensional que relaciona fuerzas de inercia y fueras de gravedad experimentadas por un flujo, esta relación permite caracterizar flujos de canales abiertos, puesto que los regímenes laminar y turbulentos no dan abasto para describir el comportamiento del flujo en dichas condiciones. Además permite diferenciar comportamiento entre un rio canal abajo o bien un flujo llano (mar abierto o lago). Lo que convierte a este número en una herramienta importante para el diseño de barcos o estructuras hidráulicas (puentes represas, entre otros) (Alvarado Yunuary, 2008).

- **Régimen supercrítico ($F > 1$):** rápido, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad prevalece la energía cinética. Propios de cauces de gran pendiente o ríos de montaña.
- **Régimen crítico ($F = 0$):** es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.
- **Régimen subcrítico ($F < 1$):** tranquilo, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, prevalece la energía potencial. Corresponde a un régimen de llanura.

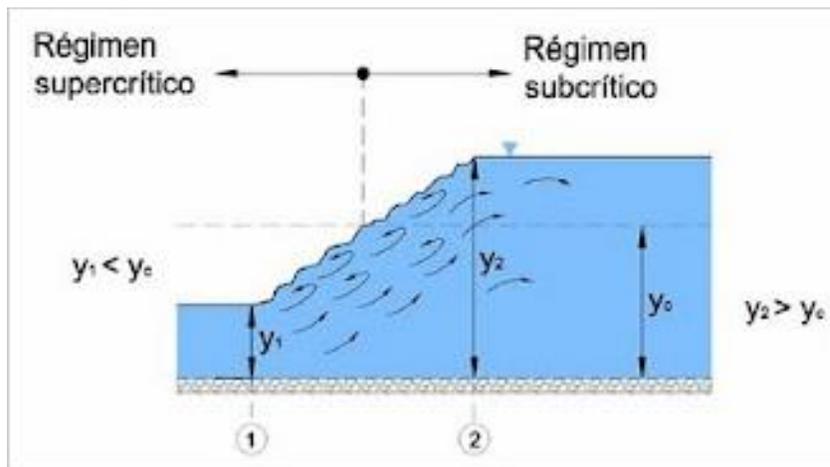


Ilustración 2.4: Diagrama de régimen supercrítico y subcrítico

En la Ilustración 2.4 se aprecia la altura crítica Y_c , que divide el régimen con el que se comporta el fluido.

2.2.2 Resistencias en la navegación

En el ámbito marítimo, se le denomina resistencia o fuerza de arrastre, a toda fuerza que se opone al movimiento. Esta fuerza se compone un sinfín de variables tales como:

Resistencia Inducida: Aquella fuerza que se induce para estabilizar el movimiento del barco, usualmente se ocupa de equilibrar fuerzas mediante una distribución de pesos del barco, de manera que no sufra movimientos oscilatorios excesivos.

Resistencia debido a la geometría: el diseño de las embarcaciones están hechas para reducir esta componente al mínimo, sin dejar de considerar un factor de seguridad. Sin embargo sigue siendo una componente no despreciable.

Resistencia por formación de Olas: una resistencia incontrolable para los navegantes, sin embargo los navegantes expertos predicen cualitativamente como afecta esta resistencia al desplazamiento del barco, permitiéndoles incluso usar esta resistencia como ventaja.

Resistencia Viscosa: Resistencia debido al medio en el que se navega, esta resistencia depende principalmente de la velocidad con la que se mueve el barco y las propiedades del medio (en este caso la densidad y viscosidad del agua de mar).

Otras Resistencias: suma de pequeñas resistencias de origen desconocido que individualmente son depreciable, sin embargo al sumarlas logran un número significativo para el desplazamiento del barco.

Es posible descomponer todas estas fuerzas de resistencias en dos vectores, como se expone en la Ilustración 7:

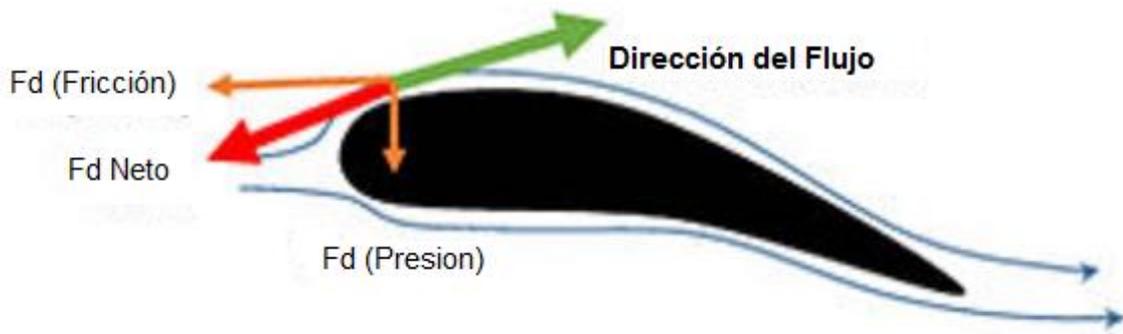


Ilustración 2.5: Diagrama de fuerzas ejercidas sobre las partículas del flujo.

Una fuerza normal a la superficie correspondiente a la presión ejercida por la inercia que lleva el fluido sobre la partícula, si no existiera esta inercia la partícula no rodearía el cuerpo, sino que chocaría y cambiaría de trayectoria. Otra fuerza tangencial debido a la fricción sobre la pared del cuerpo. Se obtiene una fuerza neta opuesta a la dirección del fluido. Se puede clasificar en aerodinámico al cuerpo cuando la fuerza por fricción supera la fuerza de por presión y se denomina cuerpo plano cuando predomina la fuerza de presión.

2.3 Diseño de Barcos

Se le denomina buque a todo elemento diseñado para navegar, tenga o no propulsión motorizada. Para una mejor comprensión del modelo, es necesario conocer las dimensiones más características en el diseño de un barco y el nombre de sus partes:

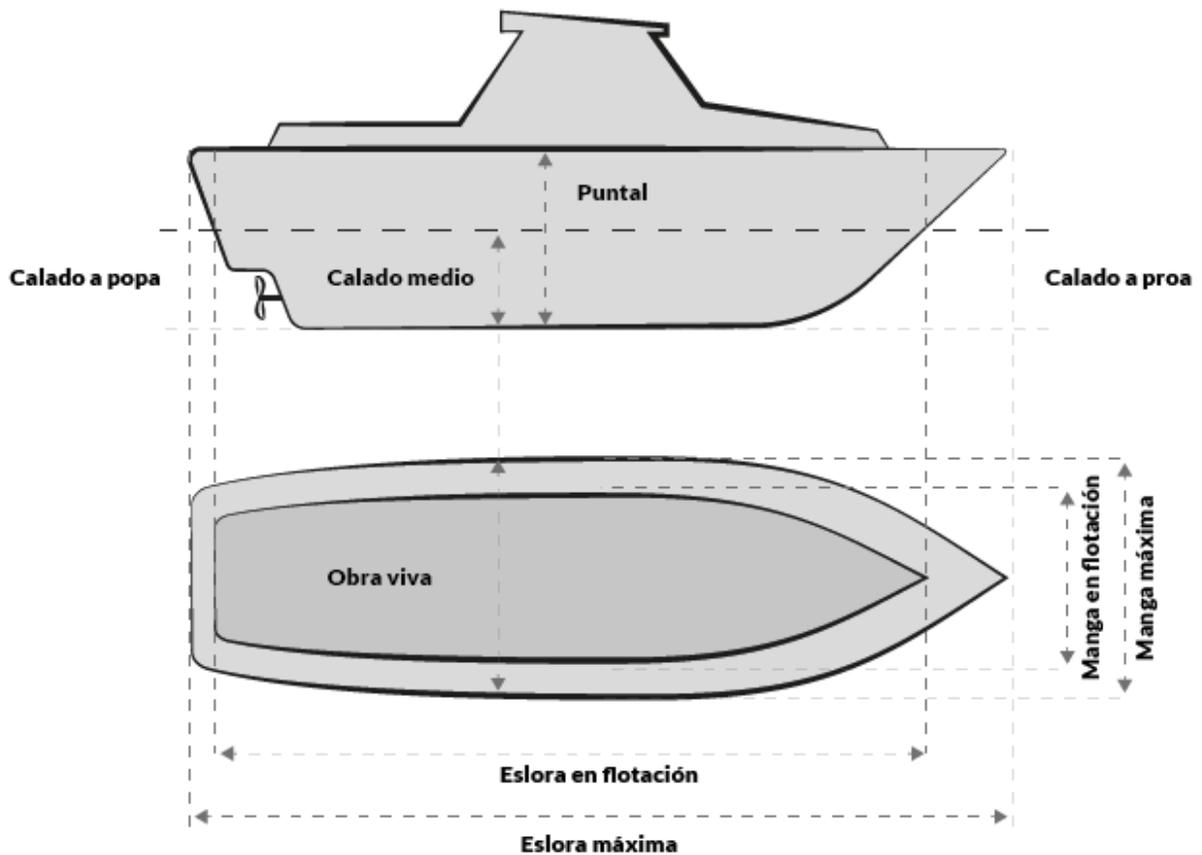


Ilustración 2.6: Barco en plano longitudinal (imagen superior) y plano horizontal (imagen inferior) (Grupo 51, 2009)

Partes del Barco:

- **Puntal:** es la distancia vertical entre el tope del casco y la cara inferior.
- **Proa:** es sección delantera del barco
- **Popa:** la sección trasera del barco
- **Calado:** es la distancia vertical entre la línea de flotación y la cara inferior del barco
- **Obra viva:** se le denomina a toda sección del barco que se encuentra bajo la línea de flotación (en otras palabras sumergida en agua)
- **Manga de flotación:** Ancho máximo de la obra viva
- **Manga Máxima:** Ancho máximo del barco
- **Eslora en flotación:** Largo máximo de la obra viva
- **Eslora Máxima:** Eslora máxima del barco

Las proporciones de estas secciones varían según la función que se desea desempeñar con el barco, pero principalmente buscan minimizar la resistencia ejercida por el agua y transportar carga sin perder estabilidad ni flotabilidad.

Para obtener la resistencia del barco hoy en día existen 4 métodos (Sinha, 2017):

- **Método Tradicional:** Consiste en realizar pruebas y exponer al barco a situaciones similares a la operacional para estudiar sus curvas de operación utilizando datos experimentales.
- **Método Basado en Regresiones:** Método predictivo que permite estimar los factores que afectan el coeficiente de arrastre total en base a datos históricos de otros modelos similares.
- **Método de Simulación CFD:** Resolución de una simulación computacional del modelo.
- **Método Pruebas Operacionales:** Realizar pruebas de operación al modelo ya terminado.

Se estima que para que un barco pequeño alcance su máxima velocidad continua, utiliza el 85% de la capacidad de su motor, considerando que gran porcentaje de la potencia del motor se pierde, o bien se utiliza para otros fines (generación de electricidad u otros mecanismos) (Chakraborty, 2017)

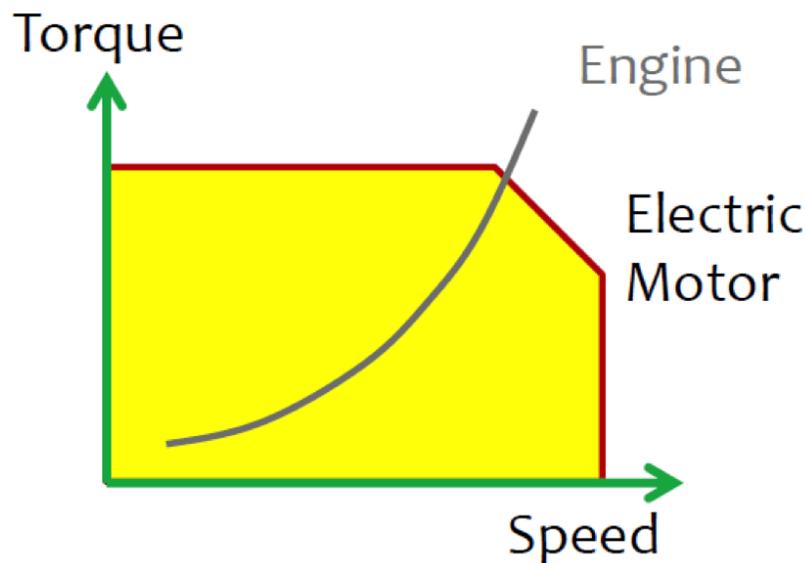


Ilustración 2.7: Relación torque del motor vs velocidad de movimiento del barco

(Chakraborty, 2017).

Este comportamiento se debe a que a mayor velocidad, mayor es la fuerza de arrastre, por lo que se requiere de gran esfuerzo del motor para seguir aumentando la velocidad de avance del barco, es por ello que existen organizaciones como IMO (International Maritime Organization) e ITTC (International Towing Tank Conference) que se dedican a estudiar y predecir la performance de un barco, limitando la potencia máxima de motores admitidos en un barco en función de su tamaño. Esta restricción tiene el fin de evitar contaminar excesivamente el medio ambiente (Chakraborty, 2017).

2.4 Ecuaciones gobernantes

Para poder estudiar el efecto de la inyección de aire sobre la obra viva del barco, se disponen de las siguientes ecuaciones que permiten comparar los resultados obtenidos en la simulación con la teoría física del modelo.

2.4.1 Fuerza de Arrastre:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \quad (1)$$

Cd: Coeficiente de Arrastre

ρ : Densidad del agua [kg/m³]

A: Área transversal al movimiento [m²]

V: Velocidad relativa entre el barco y el agua [m/s]

Si bien esta es la definición más conocida para este medio, existen también aproximaciones realizadas por investigadores del fenómeno, los cuales permiten predecir la fuerza de arrastre (Jhon Davenport, Roger N. Hughes, Marc Shorten, Poul S. Larsen, 2011).

Aproximaciones (Fuente (Jhon Davenport, Roger N. Hughes, Marc Shorten, Poul S. Larsen, 2011)):

$$F_{d,lam} = \frac{1}{2} \rho V^2 L B * 0,664 Re^{-1/2} \approx V^{3/5} \rho v^{1/2} \quad (1.a)$$

$$F_{d,tur} = \frac{1}{2} \rho V^2 L B * 0,074 Re^{-1/5} \approx V^{9/5} \rho v^{1/5} \quad (1.b)$$

L = Largo de la sección [m]

B = Ancho de la sección [m]

ρ = Densidad del medio (en este caso agua) [kg/m³]

Re= Número de Reynolds operante

V = Velocidad relativa entre el agua y el barco.

Por lo tanto la aproximación queda de la siguiente manera

$$F_{d,lam} = K_{lam} V^{3/5} \rho v^{1/2} \quad (1.c)$$

$$F_{d,tur} = K_{tur} V^{9/5} \rho v^{1/5} \quad (1.d)$$

$$\text{Siendo } K = \frac{1}{2} L^{4/5} B * C_d \quad (1.e)$$

L = Largo de la sección [m]

B = Ancho de la sección [m]

Cd= Coeficiente de Arrastre

2.4.2 Coeficiente de Arrastre:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho A V^2} \quad (2)$$

Fd= Fuerza de Arrastre neto

ρ = Densidad del fluido

A= Área transversal al movimiento

V= Velocidad relativa entre el fluido y el barco

Aproximaciones:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1+\sqrt{Re}} + 0,4 \quad (2.a)$$

Re= Numero de Reynolds operante en el modelo.

Se toma como máximo valor de Coeficiente de Arrastre, el valor obtenido por el estudio realizado por S. F. Hoerner para modelos en dos dimensiones. Puesto que la geometría es similar a la sección menos hidrodinámica del modelo utilizado en la simulación (Hoerner, 1965).

SHAPE	REF.	C_D
		1.03

Ilustración 2.8: Coeficiente de arrastre calculado en un flujo de régimen subcrítico con Reynolds entre 10^4 y 10^6 (Hoerner, 1965).

Supuesto del modelo: Como primera aproximación se consideró que el Coeficiente de Arrastre del barco diseñado se encuentra entre 0,4 y 1,03. Por lo que cualquier modelo que salga de este rango se considerara invalidado.

2.4.3 Potencia del Barco o Fuerza del Barco

$$W = F_m V \quad (3)$$

W= Potencia requerida para mover el barco [W]

F_m = Fuerza ejercida por el motor del barco [n]

V= Velocidad del barco en relación al agua [m/s]

Supuesto del modelo: La Fuerza de Arrastre es igual a la Fuerza del motor, lo que permite que el barco se mueva a velocidad constante.

2.4.4 Numero de Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (4)$$

V= Velocidad del flujo [m/s]

ν = Viscosidad cinemática del fluido [m^2/s]

D= Largo Característico (en este caso el largo del barco) [m]

2.4.5 Numero de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (5)$$

V= Velocidad del flujo [m/s]

g= Aceleración de gravedad 9,81[m/s²]

D= Distancia entre el fondo del medio (canal, tubería, etc)y la superficie del fluido[m]

2.4.6 Velocidad de Inyección de Aire

Supuesto del modelo: Para esta ecuación, que los Reynolds de inyección de aire con el Reynolds operante del modelo deben ser iguales para que el aire siga la misma trayectoria de la corriente de agua.

$$V_{IA} = \frac{Re v_{aire}}{D_{aire}} \quad (6)$$

Re= Es el número de Reynolds operante del modelo calculado en la ecuación (4)

v= Viscosidad cinemática del aire [m²/s]

D= ancho del inyector de aire [m]

2.4.7 Fuerza Tangencial debido al Esfuerzo de Corte

$$F_t = \sum_0^n \tau_e A_e \quad (7)$$

F_t= Magnitud de la fuerza tangencial a la pared del barco [N]

n = número de elementos que posee la sección que sobre la cual se está calculando la Fuerza normal.

A_e= Área del elemento en el cual se ejerce la presión hidráulica (ocasionada por el fluido en movimiento) [m²]

τ_e= Magnitud del esfuerzo de corte [N/m²]

2.4.8 Fuerza Normal debido a la Presión

$$F_n = \sum_0^n P_e A_e \quad (8)$$

F_n= Magnitud de la fuerza normal a la pared del barco [N]

n = número de elementos que posee la sección que sobre la cual se está calculando la Fuerza normal.

A_e= Área del elemento en el cual se ejerce la presión hidráulica (ocasionada por el fluido en movimiento) [m²]

P_e= Magnitud la presión ejercida [Pa]

2.5 ANSYS (Fluid Flow)

ANSYS es una plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis CAE (Computer Aided Engineering) para diferentes disciplinas de la ingeniería, permite además compilar programas modelamiento y simulación de fenómenos físicos, obteniéndose resultados gráficos y numéricos a los fenómenos modelados.

Para la obtención de resultados, ANSYS utiliza diversos métodos de elementos finitos, los cuales se basan en métodos numéricos para resolución de ecuaciones diferenciales parciales complejas (la complejidad de las ecuaciones dependen del problema físico o ingenieril que se desea estudiar), ANSYS permite selección el grado de complejidad de la ecuación y la exactitud del cálculo mediante la configuración de residuos admitidos y cantidad de iteraciones por tramo de tiempo.

Computer Aided Engineering (CAE) es una disciplina que se apoya en programas informáticos para analizar fenómenos físicos y diseños de mecanismos o piezas de ingeniería. Generalmente CAE se compone de varias etapas antes de llegar a la simulación en sí, a continuación se enumeran los pasos más generales:

- **Diseño geométrico del modelo:** Para este paso Ansys dispone del programa Design Modeler, el cual posee gran parte de las herramientas de un software CAD (Computer Aided Designing) convencional, permitiendo crear un gran número de geometrías ya sea en 2 dimensiones, como en 3 dimensiones.
- **Mallado del modelo:** Se le denomina mallado al proceso de subdividir el volumen de control en elementos y nodos (áreas y puntos respectivamente) para que el programa que resolverá posteriormente el estado físico en el que se encuentra el volumen de control, calcule el estado de cada elemento (fracción de área compuesta por nodos) y así completar el estado completo del volumen de control, para realizar esta acción, Ansys dispone del software llamado Meshing
- **Configuraciones Físicas:** Selección y configuración de condiciones de borde, propiedades y estados de los materiales dentro del volumen de control, interacción entre ellos y ecuaciones gobernante en el modelo.
- **Método Numérico:** Seleccionar grado de complejidad de las ecuaciones gobernantes, selección de método de convergencia, numero de iteraciones para llegar a la solución.
- **Simulación:** Una vez configurado el modelo, el programa realiza la simulación de manera automática, cuando programa se encuentra iterando puede ser detenido manualmente, o de manera automática cuando converge a una solución o diverge sin encontrar una única solución.
- **Obtención y análisis de resultados:** ANSYS además permite obtener datos durante la simulación, sin embargo es más común obtenerlos utilizando el programa CFD Post Procesing, el cual permite extraer, gráficos, ilustraciones y tablas de datos del modelo.

Para una correcta simulación se debe programar un modelo que se asemeje lo más posible a la realidad, teniendo en cuenta siempre que debe haber un respaldo teórico (e idealmente experimental) detrás que permita aprobar que la simulación representa algo de acuerdo a las físicas presentes en la realidad.

3 METODOLOGIA

3.1 Definición del modelo

Se determinan las geometrías del barco y las proporciones del volumen de control en el que se trabajara, basándose en un modelo existente en el mercado, cuyas características son lo más comunes posibles, de manera de que este trabajo sea representativo de la mayor cantidad de barcos posible.

3.1.1 Estimaciones en base a modelos reales

Se selecciona un modelo de barco, cuya geometría es la más común entre las embarcaciones, de modo que el estudio es representativo de gran parte de las embarcaciones, luego por temas de recursos disponibles (computadores con ANSYS y capacidad de los procesadores) se opta por simular una embarcación pequeña, para reducir tiempos de convergencia del programa.

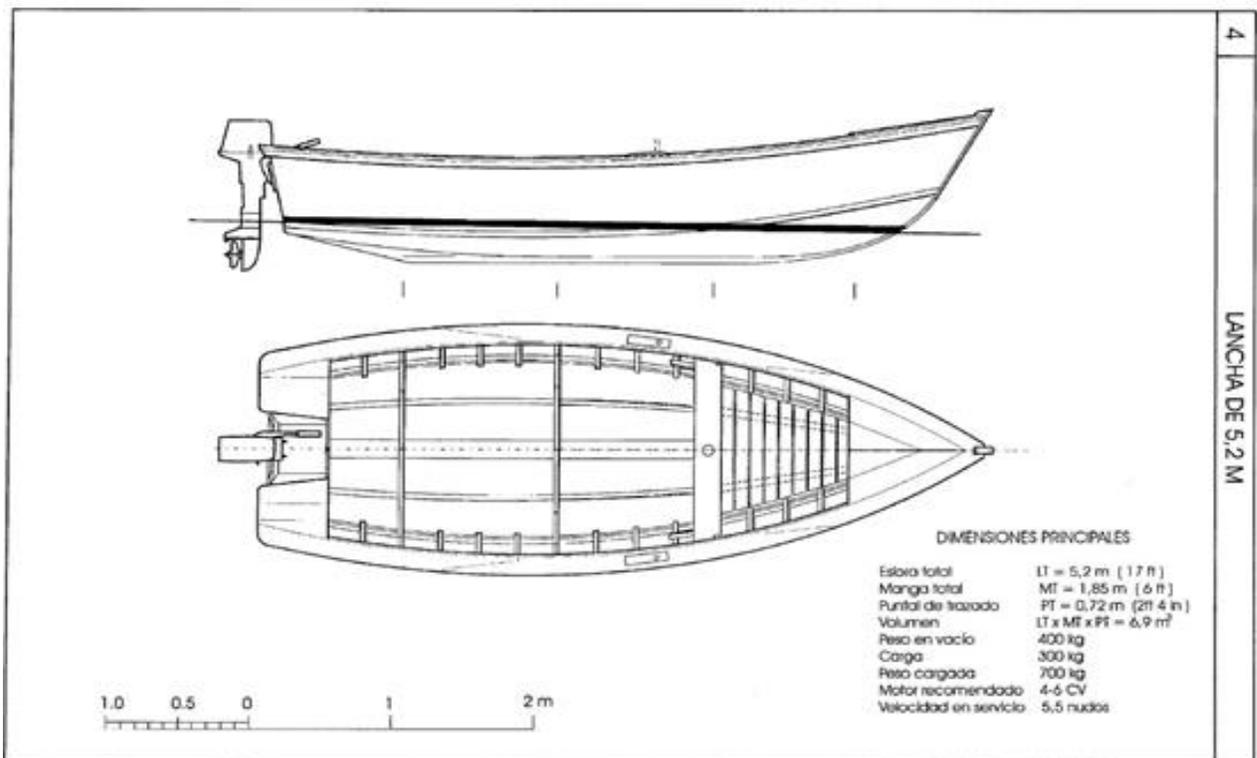


Ilustración 3.9: Modelo de Referencia (modelo de catálogo en venta) (*Distribuidor, 2007*).

Se utiliza como referencia la geometría expuesta en la Ilustración 3.9, al cual se le añade un inyector en la sección delantera de la obra viva del barco, de manera que la lubricación en base de aire atraviese el contorno del barco. A diferencia del mecanismo utilizado por el pingüino, la inyección de aire será continua.

Para estudiar este fenómeno se determinó las siguientes condiciones del barco:

- El barco se desplaza a velocidad constante (en un rango de 1,3 [m/s] y 4 [m/s]), es decir La fuerza con la que actúa el motor del barco tiene igual magnitud que la fuerza de arrastre.
- No existe oleaje ni marejada que alteren el movimiento del barco, es decir F_d es constante en estado estacionario.

- La Inyección de burbujas se encuentra a un milímetro de la proa y posee un espesor de 0,01[m].
- Las fuerzas de empuje y de peso son las únicas que actúan en el eje Z, y estas no intervienen en la inyección de aire y se encuentran en equilibrio.

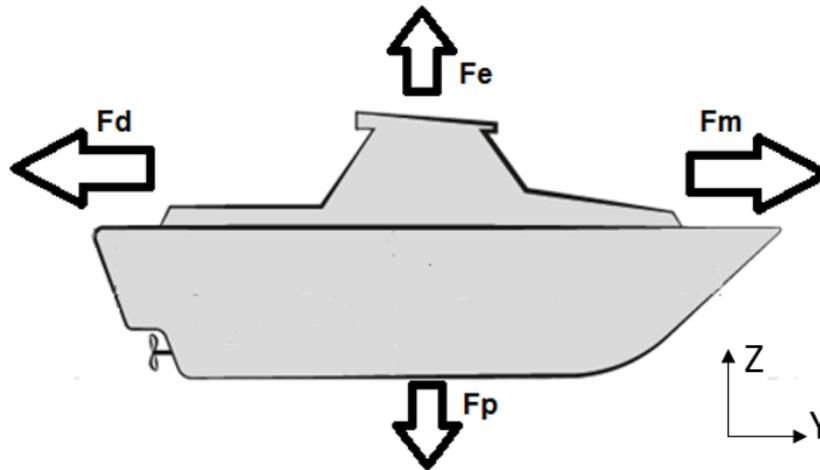


Figura 3.2: Diagrama de fuerzas sobre el barco plano longitudinal (elaboración propia).

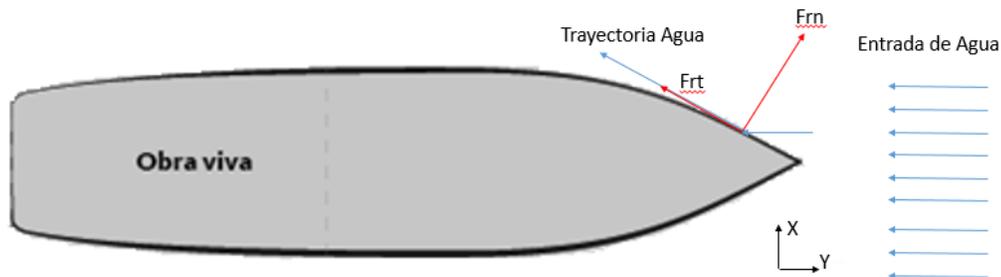


Figura 3.3: Diagrama de fuerzas sobre el barco plano horizontal (elaboración propia).

En el diagrama de fuerzas de la Figura 3. se aprecia las fuerzas que actúan sobre el barco en el eje Y son Fuerza del motor (F_m) y Fuerza de arrastre (F_d), estas fuerzas poseen igual magnitud cuando el barco se navega a velocidad constante.

Las fuerzas ejercidas sobre el eje Z son la fuerza de peso (F_p) y la Fuerza de Empuje (F_e).

Finalmente se aprecia en la Figura 3.2 las fuerzas de reacción de la pared del barco por efecto del movimiento de las particular del flujo (son opuestas a las de la Ilustración 2.7). Un supuesto importante es que las fuerzas actúan de manera simétrica, por lo que al sumar los vectores en ambas caras del barco se anulan las fuerzas en el eje X, por lo que resulta vector en el eje Y oponiéndose al movimiento.

3.1.2 Descripción del modelo hecho en ANSYS

El modelo posee un volumen de control de $5 \times 27,3 \times 0,1$ [m³] que contiene la silueta de un barco con vista del plano horizontal. El barco es inspirado en la Ilustración 3.9 en cuanto a geometrias, dimensiones y capacidades.

Puesto que el modelo es simétrico, se utilizó solo la mitad del volumen del control con el fin de reducir recursos sin afectar el estudio del fenómeno. Además corresponde a un corte transversal de 1 centímetro de grosor sumergido bajo el agua. Estas medidas reducen significativamente el tiempo requerido para obtener resultados, además de lograr una gran reducción de peso digital (Giga Bytes) del modelo.

3.1.3 Geometría del Modelo

La geometría del modelo es diseñada utilizando Design Modeler, Software incluido en la versión académica de ANSYS 17.1

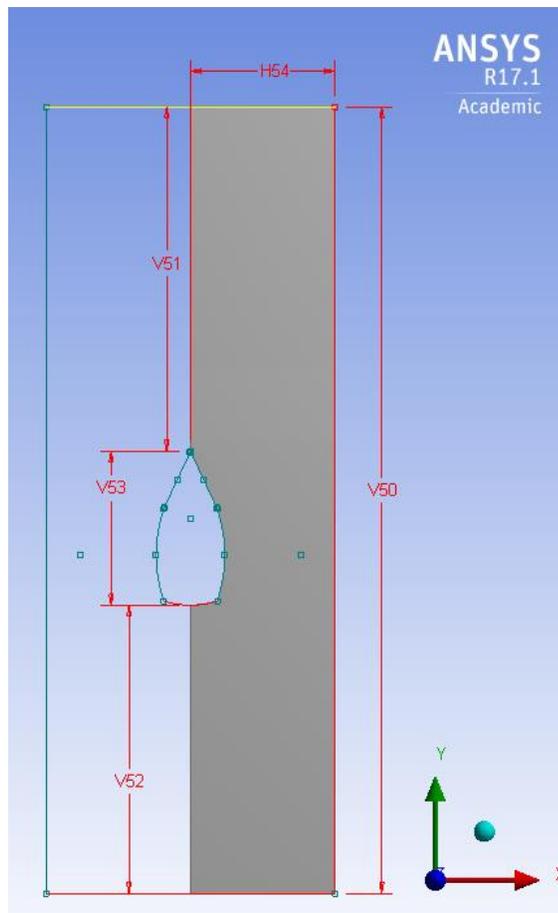


Figura 3.4: Volumen de Control

Dimensiones Volumen de Control:

- V50: Largo total de volumen de control 27,3 [m]
- V51: Distancia entre la entrada de agua y el barco 12 [m]
- V52: distancia entre el barco y el fin del volumen de control 10 [m]
- V53: Eslora de Flotación del barco 5,3 [m]
- H54: Ancho del volumen del control 5 [m]

En la Figura 3., se aprecia en color gris el volumen de control utilizado con sus respectivas dimensiones, se puede observar también que la silueta del barco esta vista desde el plano XY (Plano Horizontal) y que el volumen de control contempla únicamente la sección derecha del barco puesto que este es simétrico, se asume el fenómeno se comporta de igual manera en ambos lados.

La distancia entre el barco y los extremos del volumen de control son diseñados para que el fluido se comporte de manera natural, de esta manera tiene tiempo de interactuar sobre sí mismo en un canal abierto natural antes de toparse con el cuerpo solido (en este caso el barco).

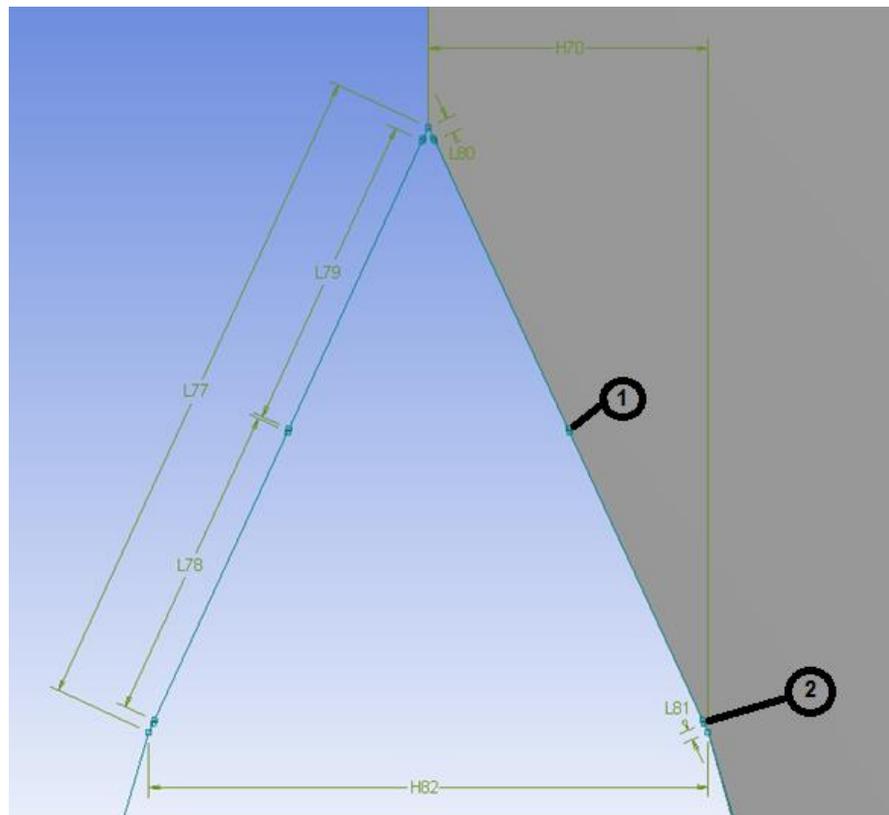


Figura 3.5: Sección Frontal

Dimensiones Sección Frontal:

- H70: Ancho de la Sección Frontal 0,925 [m]
- L77: Largo total de la Sección Frontal 2,2 [m]
- L78: Distancia entre el primer inyector de aire y el centro de la sección **(1)** 1,05[m]
- L79: Distancia entre el centro de la sección y una área auxiliar **(2)** antes del cambio de sección 1,05[m]
- L80: Distancia entre la Proa o Borde de Ataque con el Inyector de Aire 0,05[m]
- L81: Distancia entre el área auxiliar **(2)** y el cambio de sección 0,03[m]
- H82: Manga de Flotación del área frontal de barco diseñado 1,85[m] (siendo únicamente 0,925 [m] correspondientes al volumen de control)

Para analizar con mayor detención esta zona, se dispuso de áreas auxiliares 1 ($0,1 \times 0,01$ [m²]) y 2 ($0,2 \times 0,01$ [m²]), las cuales permiten un refinamiento mayor en esas zonas. Notar el área auxiliar 2 posee el doble de área, por lo que puede analizarse en dos secciones. (2.a y 2.b) las cuales poseen 4 elementos cada uno. Es importante refinar bien la zona (2) debido a que ahí se produce un cambio de sección importante para la capa límite.

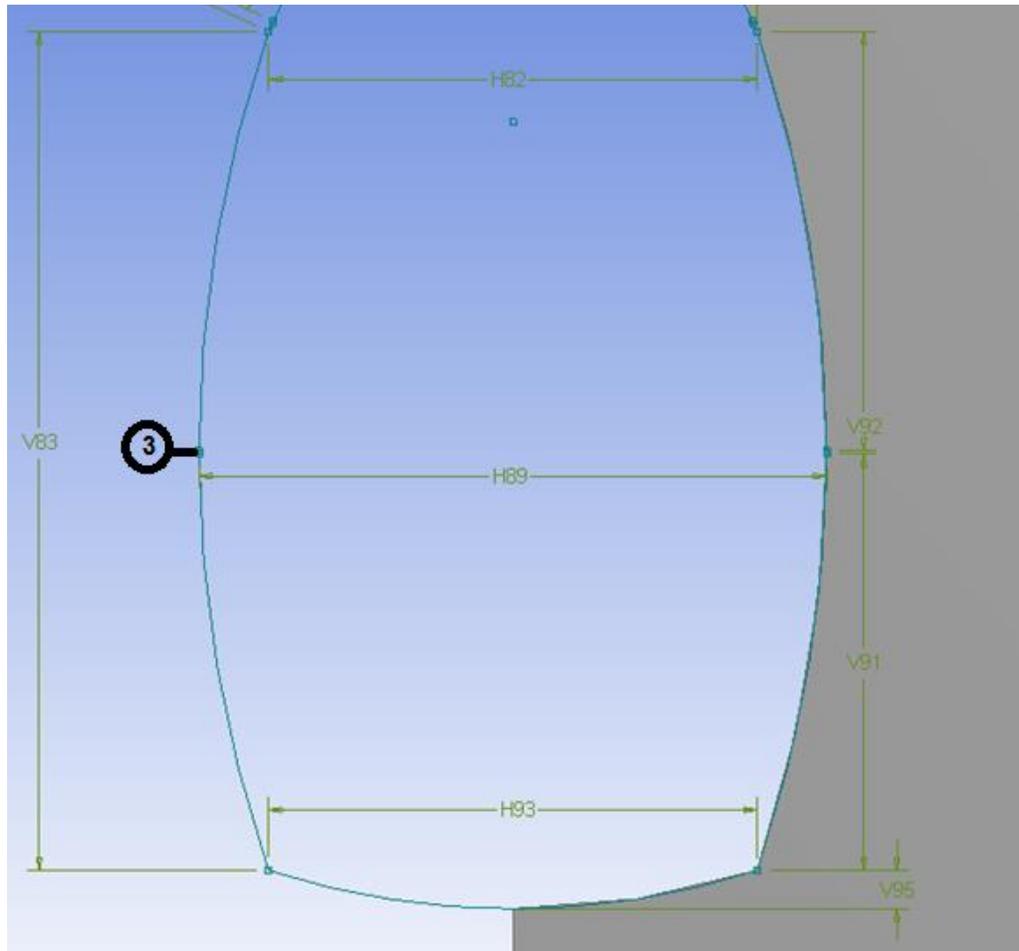


Figura 3.6: Sección Lateral y Trasera

Dimensiones Sección Lateral y Trasera del barco:

- H82: :Manga mínima de Flotación 1,85[m] (siendo únicamente 0,925 [m] parte del volumen de control)
- V83: Distancia entre sección Frontal y sección Trasera 3,2 [m]
- H89: Manga Máxima de Flotación del barco 2,35 [m] (siendo únicamente 1,76[m] parte del volumen de control)
- V91: Distancia entre cambio de sección (trasera) y el centro de la sección **(3)** 1,6[m]
- V92: Distancia entre cambio de sección (frontal) y el centro de la sección **(3)** 1,6[m]
- H93: Manga mínima de Flotación de. barco 0,925[m]
- V95: Distancia entre la sección Lateral y la Proa

En la Figura 3.6 se aprecia una curvatura en la sección lateral y trasera del barco, para la sección lateral esta curvatura, en el caso de la sección lateral el radio de curvatura es de 5,18[m] y el ángulo descrito es de 37,24°. En el caso de la sección trasera el radio de curvatura es de 3[m] y el ángulo descrito de 36°. Al convertir los grados en radianes y calcular el largo de la sección, se obtienen los siguientes resultados:

- Largo sección Lateral: 3,25[m]
- Largo total sección trasera: 1,88[m] (siendo únicamente 0,94[m] parte del volumen de control)

Cabe mencionar que el área auxiliar (3) tiene las mismas dimensiones que (1) y (2).

Finalmente las dimensiones que forman parte del volumen de control se le denominan Dimensiones características del modelo y se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 2: Dimensiones Características del Modelo

Sección	Eslora[m]	Manga [m]	Largo[m]	N° de Elementos	Área de las Caras [m²]
<i>Total</i>	5,3	1,18	6,4	250	0,64
<i>Frontal</i>	2	0,93	2,2	100	0,22
<i>Lateral</i>	3,2	1,18	3,3	118	0,33
<i>Trasera</i>	0,15	0,93	1,9	32	0,19

3.1.4 Mallado

El mallado es realizado mediante el software Meshing, disponible en la versión académica 17.1 de ANSYS

Para definir el mallado primero hay que nombrar cada sección, de esta manera se pueden configurar las condiciones de borde del modelo. Luego se le realiza un mallado del volumen de control para la obtención de datos. Ansys permite realizar refinados en 3 niveles, aumentando la calidad del refinado a mientras más alto sea el nivel. Se realiza un refinado nivel 3 en las secciones de interés (en este caso en todas las paredes del barco). El objetivo del refinado es aumentar la densidad de datos analizables en la sección del barco, puesto que se quiere estudiar las fuerzas de reacción de las paredes del barco sin aumentar la densidad de elementos en todo el volumen de control. Dado que el volumen de control es de gran tamaño en comparación al barco, realizar un mallado refinado en todo el volumen de control costaría gran cantidad de recursos del computador (más horas de iteración y documentos que ocupan más espacio del disco), sin lograr una diferencia significativa en los resultados que justifique dicho costo.

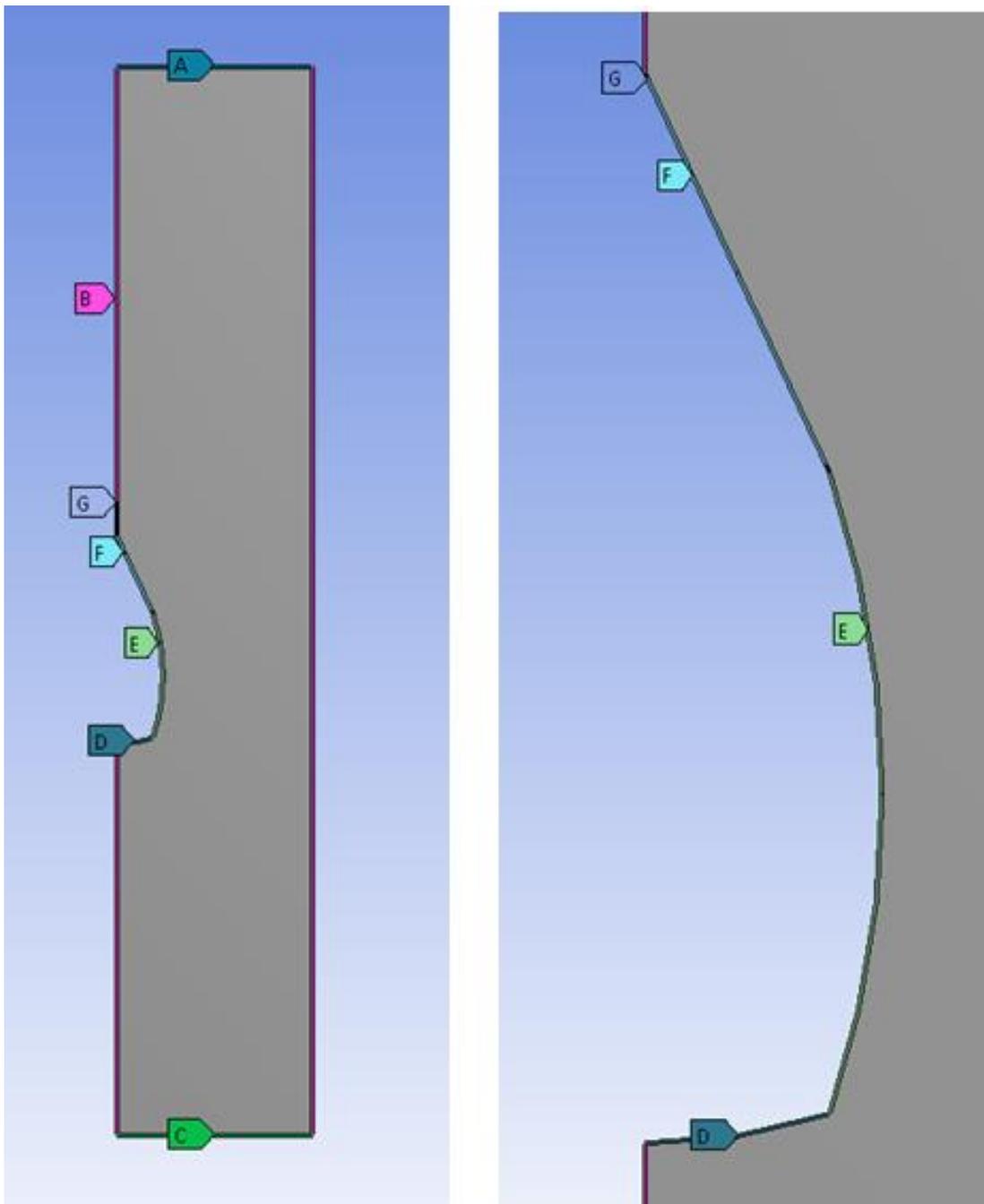


Figura 3.7: Nombre de las Secciones del mallado del modelo. A la izquierda el volumen de control completo y a la derecha el barco.

- A. Entrada de Agua.
- B. Salida de Agua por Presión.
- C. Salida de Agua por Presión.
- D. Área Trasera del Barco.
- E. Área Lateral del Barco.
- F. Área Frontal del Barco.
- G. Inyector de Aire.

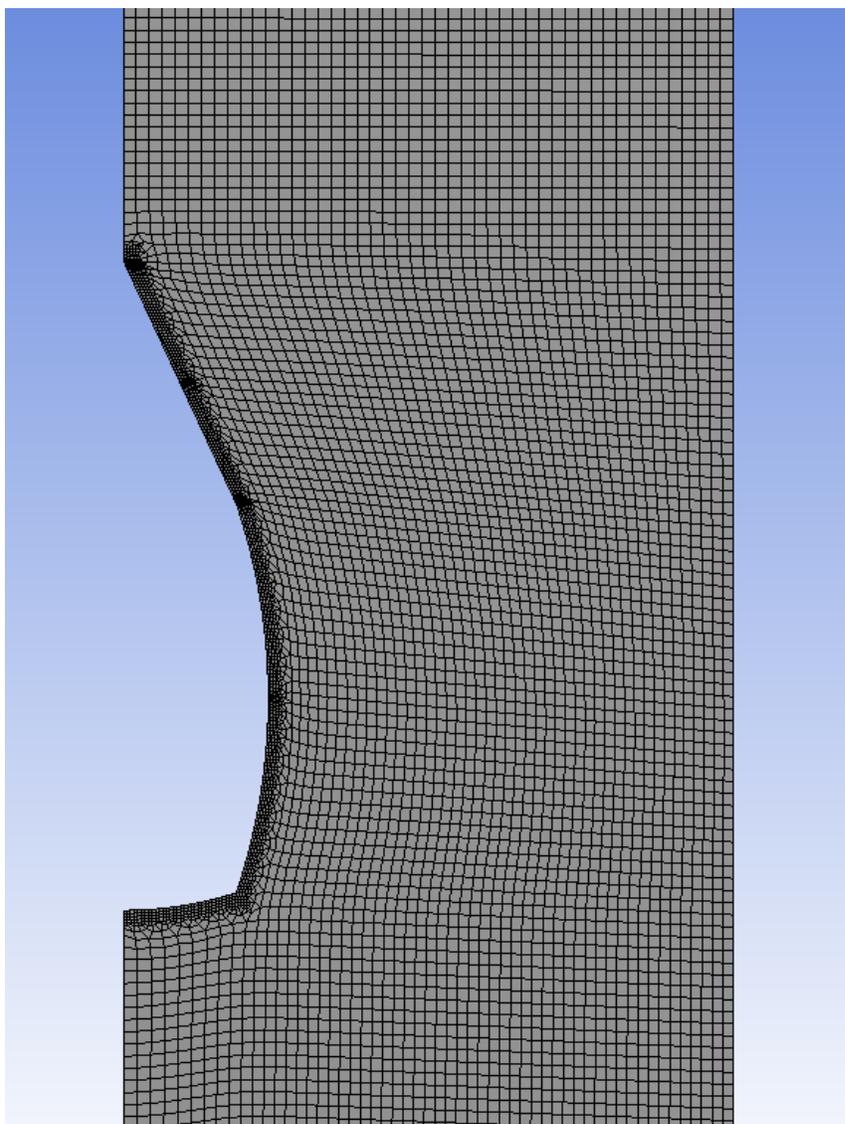


Figura 3.8: Mallado del volumen de control.

Tabla 3: Resumen de distribución de elementos del mallado

Sección	Largo [m]	Área [m²]	N° de elementos	Área de cada elemento[m²]
<i>Frontal</i>	2,2	0,22	100	0,0022
<i>Lateral</i>	3,25	0,33	118	0,0028
<i>Trasera</i>	1,88	0,19	32	0,0059

Ansyes posee su propio algoritmo para determinar la cantidad de elementos en función del área que se refina, de esta forma se obtiene un total de 250 elementos en la pared del barco, esta cantidad se obtuvo mediante un refinamiento de calidad 3 cuya distribución se describe en la Tabla 3. Para el cálculo del área de cada sección, se multiplicó el grosor del volumen de control (0,1m) y el largo de la sección.

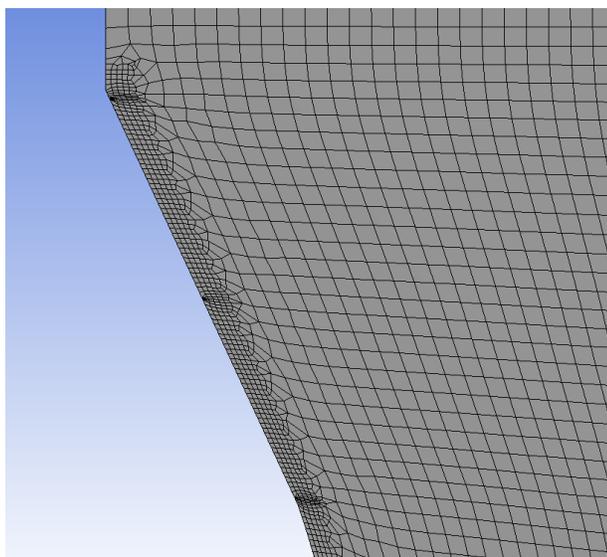


Figura 3.9: Mallado de la zona frontal

En el Mallado de la zona frontal, se puede apreciar una mayor concentración de elementos al inicio, al centro y al final de esta sección. El primer refinamiento se debe a que ahí es donde se localiza el inyector de aire, mientras que los últimos dos son zonas auxiliares para futuros análisis.

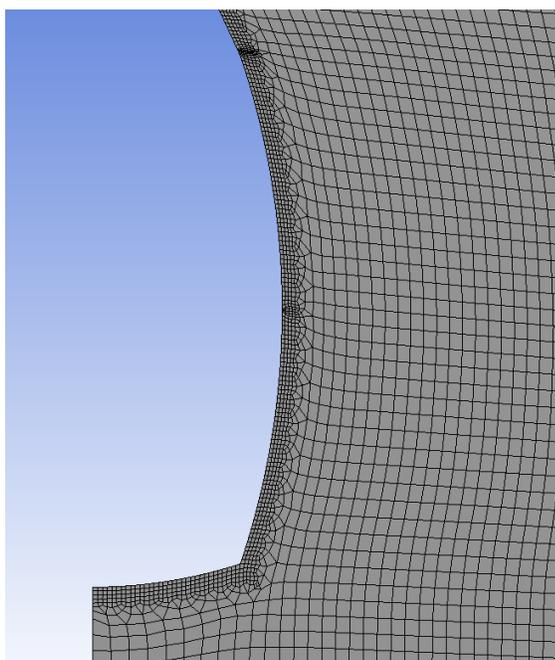


Figura 3.10: Mallado de la sección lateral y trasera.

En el mallado de la Sección Lateral se puede observar un refinamiento al inicio y en el punto medio, estos puntos son de interés para el análisis de esfuerzos debido a los cambios de secciones que se generan. En cuanto a la Sección Trasera no se realizó un refinamiento auxiliar debido a que en esta sección en el arrastre experimentado por el barco es menor al 1% del total en todos los modelos t.

3.1.5 Configuraciones de Condiciones de Borde

Para la configuración física del modelo se utiliza Fluent (herramienta de la versión académica 17.1 de ANSYS).

El modelo es Multifásico (agua y aire), en estado Transiente, con de gravedad en el eje Z. Esto último debido a que la presencia de gravedad permite darle inercia al fluido, generando una interacción entre el agua y el aire (tensión superficial de 0,071[n/m]).

Se considera una presión constante de 105.000 [Pa] debido a la profundidad en que se encuentra la sección estudiada (0,2[m]). También se permite la adhesión de fluidos en las paredes (tanto del agua como del aire).

Tabla 4: Propiedades de los materiales del modelo

Material	Densidad [kg/m³]	Viscosidad Dinámica [kg/ms]
<i>Aire</i>	1,225	0,00001,7894
<i>Agua</i>	998,2	0,001003
<i>Aluminio</i>	2719	-

Para el cálculo del modelo se imponen como condiciones de borde la velocidad del agua en la entrada (variable entre 1,3m/s y 4,0m/s según indique cada modelo), el barco posee murallas de aluminio, el aire es inyectado desde la sección frontal y el barco se encuentra navegando a mar abierto (se puede observar un diagrama de las condiciones en la Figura 3.7).

Se realiza un análisis standard con inicialización desde la entrada de agua, es decir calcula el estado de cada elemento del mallado a partir de la entrada de agua y va recorriendo todo el volumen de control hasta la salida de agua inferior.

Para evitar divergencias se divide el instante de simulación en 0,001 Time Steps, que quiere decir divide 1 segundo en 1000 fragmentos de tiempo, por lo que calcula el estado de cada elemento del modelo 1000 veces por segundo. Además se le pide a ANSYS que guarde los resultados cada 100 Time Steps, de manera de poder tener un registro la evolución de los resultados cada 0,1 segundo de ejecución del modelo. Finalmente se calcularon 25000 Time Steps, lo que equivale a 25 segundos del barco navegando a la velocidad de entrada del agua. Este último parámetro busca que el modelo simulado en estado transiente llegue a un estado estacionario para poder ser analizado.

3.2 Validación del modelo:

Dado que no se tienen datos experimentales para comparar los resultados, se utiliza bibliografía sobre el tema para tener un margen de resultados aceptables para el estudio. A continuación se detallan las consideraciones para validar el modelo estudiado.

3.2.1 Validación del Mallado

Una vez definida la geometría del modelo, se procede a analizar cómo afecta la configuración del mallado en los resultados. Para ello es necesario evaluar al menos 3 modelos con distinto grosor de mallado (variación en el tamaño del área de cada

elemento del volumen de control). Se seleccionan dos velocidades representantes del rango de velocidades con el que se trabaja, en este caso se utilizan las velocidades extremas (1,3 y 4,0 [m/s]), ya que son los rangos de operación más radicales del espectro estudiado.

Tabla 5: Resumen de elementos según configuraciones de mallado.

Configuración de Mallado	Modelo Grueso	Modelo Intermedio	Modelo Fino
<i>N° de elementos en la sección frontal</i>	60	100	130
<i>N° de elementos en la sección lateral</i>	70	118	170
<i>N° de elementos en la sección trasera</i>	20	32	50
<i>N° de elementos en total en la pared del barco</i>	150	250	350
<i>N° elementos totales en el volumen de control</i>	4380	15151	29594

Luego se considera una configuración de mallado no es determinante en el resultado final, si la diferencia entre los datos obtenidos es inferior al 5%.

3.2.2 Validación del Volumen de Control

Se trabajan con 3 tamaños de volumen de control diferentes sobre el barco, variando distancias entre el barco y los bordes del espacio simulado. Este criterio es importante para determinar cuánto afecta el entorno en el que se mueve el barco, pues se quiere cuantificar cuanto afecta tener agua en zonas adyacentes al barco, o bien agua estática en las zonas cercanas al barco. Esta necesidad surge principalmente porque Ansys permite programar velocidades de flujo en el volumen de control, sin embargo fuera de él, asume que el agua esta estática (pudiendo entrar o salir del volumen de control según como le afecten las condiciones adentro del volumen de control al agua que se encuentra afuera).

Tabla 6: Resumen de mallado según su volumen de control.

Tamaño Volumen de Control [m²]	27,3x5	27,3x10	27,3x15
<i>N° de elementos en la sección frontal</i>	100	109	113
<i>N° de elementos en la sección lateral</i>	116	131	142
<i>N° de elementos en la sección trasera</i>	32	36	36
<i>N° de elementos en total en la pared del barco</i>	248	276	291
<i>N° elementos totales en el volumen de control</i>	15151	28917	42939

Es importante mencionar que pese a que el mallado está configurado de la misma forma para los 3 casos, sin embargo el algoritmo que utiliza Ansys para la división de elementos, le demanda refinar levemente el tamaño de los elementos alrededor del barco.

Se considera una configuración de mallado no es determinante en el resultado final, si la diferencia entre los datos obtenidos es inferior al 5%.

3.2.3 Parametrización de los Modelos

Con el fin de comparar los diferentes modelos en igual de condiciones, se usa como parámetro trabajar en estado estacionario, se denomina así porque el fenómeno encuentra un equilibrio del cual no posee cambios radicales a través de intervalos de tiempo pequeños. Si bien la simulación se realiza en estado transiente, hay que encontrar y comprobar un instante de tiempo en que el modelo más lento (1,3 [m/s]) y el modelo más veloz (4,0 [m/s]) alcanzan un estado estacionario. Para ello se evalúan los resultados obtenidos en un intervalo de tiempo de 0,1s y si la diferencia obtenida es menor a 5%. Se considera que el modelo alcanzo el estado estacionario y es apto para pasar a la siguiente fase (inyectar aire).

3.2.4 Validación de Resultados

Para comprobar la valides de los resultados, se calculan aproximaciones teóricas de los modelos, se considera que el modelo da resultados validos cuando éstos se encuentran dentro del rango aproximado utilizando las Ecuaciones (1) y (1.b) como aproximación superior e inferior respectivamente. Luego se verifica gráficamente que los resultados obtenidos en Ansys se mantengan dentro de este rango. También se comprueba visualmente que en el volumen de control no ocurran anomalías tales como devolución de flujo, capa limite inverosímil con la simulación y que los vectores de esfuerzos tengan dirección y sentidos acordes al modelo).

3.3 Definir parámetros de entrada

Para estudiar la influencia de la inyección de aire en la obra viva del barco, se eligen las variables de Velocidad del de Entrada de Agua y Velocidad de Inyección de Aire como parámetros de cada modelo.

El rango de velocidades de entrada de agua (que simula la velocidad de navegación del modelo) varía entre 1,3 [m/s] y 4[m/s] (un barco navegando entre 2,5 nudos a 7.8 nudos respectivamente, velocidades de operación de barcos de estas proporciones). Dentro del rango de velocidades de operación mencionadas, se utilizaran 10 velocidades diferentes (equiespaciadas entre ellas por 0,3 m/s) y se simularan cada una de ellas en presencia de inyección de aire continuo y ausencia de dicha inyección.

En cuanto a la velocidad de inyección fue ajustada a cada modelo para que el número de Reynolds de operación del barco tuviese el mismo valor que el de inyección de aire, de tal manera que la relación de fuerzas se equilibren y sigan el contorno del barco en lugar de fragmentarse o tomar una trayectoria fuera de la capa limite. De modo que se trabaja con relación descrita en la Ecuación (6)

3.4 Recolectar datos analizar y comparar

Durante la simulación es posible recolectar los datos de presión hidráulica sobre la pared del barco en Pascales, puesto que se posee el conocimiento de la cantidad de elementos en la pared y el tamaño del área de cada uno de ellos, es posible transformar dicha presión en vectores de fuerza multiplicándolo por el área donde es ejercida dicha presión. Este vector de fuerza, es la reacción normal de la pared del barco.

También se obtiene los datos de esfuerzos de corte en la superficie de cada uno de los elementos, que al multiplicar por el área de cada elemento, se obtiene la fuerza tangencial del modelo (también llamada fuerza por fricción).

Con ambos datos es posible obtener la fuerza neta de arrastre, con ella es posible calcular el coeficiente de Arrastre del modelo y posteriormente analizar el costo de potencia que implica mover el barco a la velocidad de cada uno de los modelos.

El análisis de los resultados se basa en comparar los resultados obtenidos de los Modelos CIA (Con Inyección de Aire), y los resultados obtenidos de los modelos SIA (Sin Inyección de Aire), luego se verifico si ambos resultados se encuentran dentro el margen preestablecido y finalmente calcular el porcentaje de reducción que se produjo cuando el modelo se encuentra inyectando aire.

4 RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se detallan los resultados obtenidos de los modelos más representativos tablas y gráficos resumen de todos los modelos. El resto de los resultados se exponen en los anexos.

Tabla 7: Nombre y características de los modelos

Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V[m/s]$	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
$V_{IA}[m/s] (6)$	9,9	12,1	14,4	16,7	19,0	21,2	23,4	25,9	27,9	30,1
$Re(4)*10^3$	5,59	6,78	8,05	9,32	10,59	11,86	13,14	14,41	15,68	16,95

4.1 Validación de los modelos SIA

4.1.1 Validación del mallado:

Tabla 8: Resultados según su mallado.

Configuración del Mallado	Grueso	Intermedio	Fino
<i>N° elementos totales en el volumen de control</i>	4380	15151	29594
<i>N° de elementos en la pared del barco</i>	152	250	350
<i>Arrastre Neto Modelo 1</i>	454,7	399,9	387
<i>Diferencia % respecto del mallado intermedio</i>	+13,9%		-3,2%
<i>Arrastre Neto Modelo 10</i>	2944,0	2984,3	2916,0
<i>Diferencia % respecto del mallado intermedio</i>	-4,9%		-3,1%

Finalmente se opta por utilizar un mallado intermedio, puesto que no presenta gran diferencia en los resultados en con el mallado fino, mientras que el mallado grueso para bajas velocidades hay una diferencia del 13,9%.

4.1.2 Validación del Volumen de Control:

Tabla 9: Resultados según su volumen de control.

Tamaño Volumen de Control [m²]	27,3x5	27,3x10	27,3x15
<i>N° elementos totales en el volumen de control</i>	15151	28917	42939
<i>N° de elementos en la pared del barco</i>	250	276	291
<i>Arrastre Neto Modelo 1 [N]</i>	399,9	397,3	415,8
<i>Diferencia % respecto del mallado intermedio</i>	-	-0,7%	+3,9%
<i>Arrastre Neto Modelo 10[N]</i>	4449,5	4601,5	4275,4
<i>Diferencia % respecto del mallado intermedio</i>	-	+3,4%	-3,9%

Se concluye que no es necesario aumentar el volumen de control, puesto que no hay una diferencia significativa (mayor al 5%) o tendencia clara en el comportamiento (aumento o

decrecimiento) de los resultados. Además se tiene un margen de error de +- 3,9% en los resultados del modelo, pues esa fue la diferencia más grande observada.

4.1.3 Parametrización de la simulación

Siendo los modelos 1 y 10 los extremos del rango con el que se trabaja, se utilizan como sujeto de prueba para validar que el modelo llega a estado estacionario.

Tabla 10: Evaluación de estado estacionario

Tiempo de simulación [s]	25s	25,1s	25,2s
<i>Fuerza de Arrastre Modelo 1 SIA</i>	406,12	405,20	405,16
<i>Diferencia %</i>		-0,225%	-0,010%
<i>Fuerza de Arrastre Modelo 10 SIA</i>	4542,18	4535,78	4535,69
<i>Diferencia %</i>		-0,141%	-0,002%

Como se observa en la Tabla 10, la diferencia de los resultados obtenidos entre los intervalos de tiempo son menores al 1%, se considera que el modelo llega a estado estacionario en el segundo 25.

4.1.4 Validación de los resultados

En esta sección se calcula la fuerza neta esperada por los modelos utilizándolas Formulas (1) y (1.b), Para el uso de estas fórmulas primero se debe estimar el Coeficiente de Arrastre (C_d), esta aproximación viene del promedio entre las aproximaciones (2.a) y la referencia de la Ilustración 2.8 (Hoerner, 1965) dando un resultado un valor de **0,765** para el **Coeficiente de Arrastre**. Con este valor es posible utilizar la formula (1) sin embargo para la formula (1.b) aún hay que calcular el coeficiente K_{TUR} , para ello se utiliza la formula (1.e) con los siguientes valores:

Tabla 11: Valores para calcular K_{TUR}

Sección	Largo	Ancho	$K_{TUR}(1.e)$
<i>Frontal</i>	2	0,925	0,61
<i>Lateral</i>	3,2	1,1766	1,13
<i>Trasera</i>	0,146	0,925	0,08
<i>Total</i>	5,3	1,1766	1,69

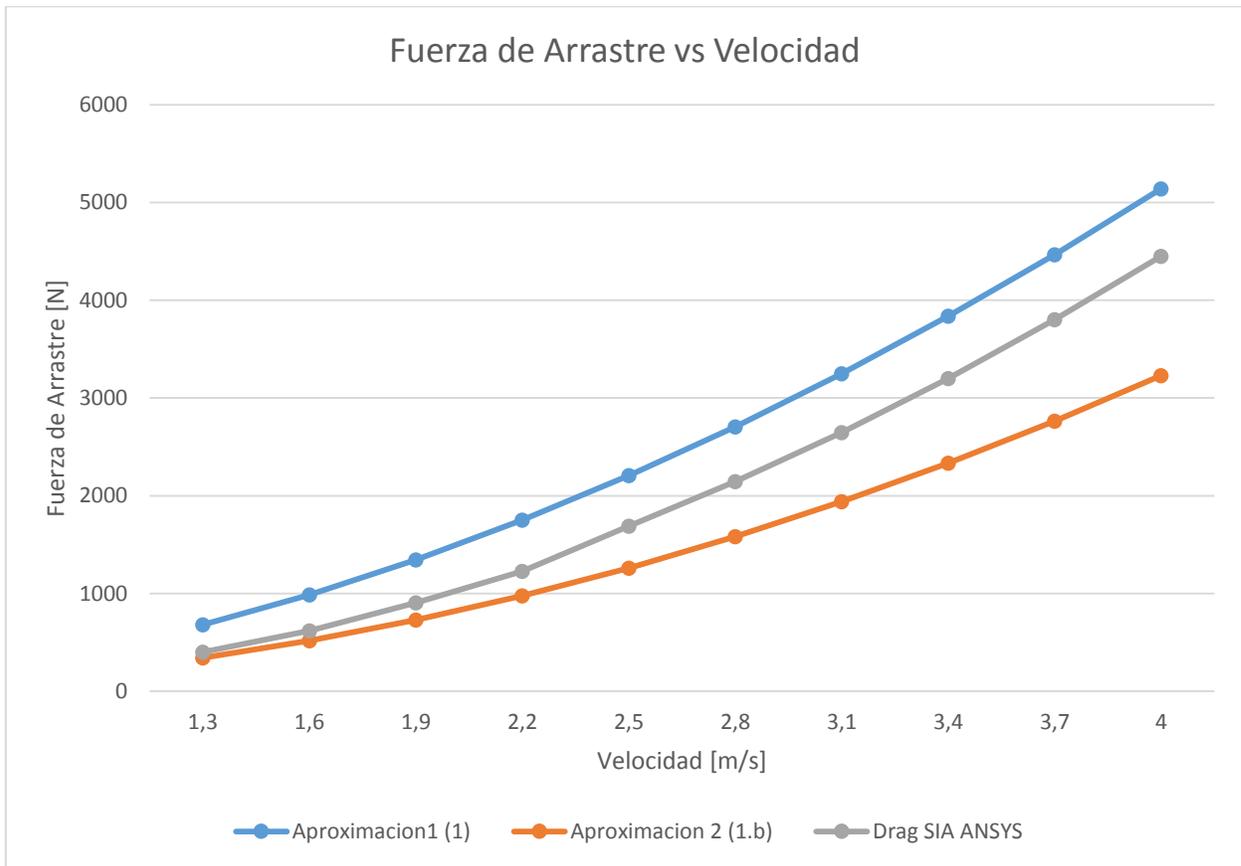


Figura 4.1: Grafico de validación de resultados.

Como se puede apreciar, las Fuerzas de arrastre obtenidas por la simulación en ANSYS (Drag Sin Inyección de Aire) se mantienen dentro del margen esperado en todos los puntos, lo que permite afirmar que la bibliografía respalda el resultado obtenido por la simulación para este margen de velocidades.

4.2 Análisis Diagrama de Fases:

A continuación se detallan los diagramas de fase de los modelos 1, 4, 7 y 10. Con el fin de ver cómo evoluciona la inyección de aire al aumentar la velocidad del barco. Para Ansys los elementos tienen un porcentaje de aire y de agua, por lo que se determinó que todo elemento sobre la pared del barco cuya composición de aire sea mayor al 60% es considerado un elemento cubierto de aire, de lo contrario se denomina que es un elemento cubierto de agua.

En los diagramas de fase se aprecia en color azul todo elemento conformado por agua, mientras que en color blanco son los elementos conformados por aire.

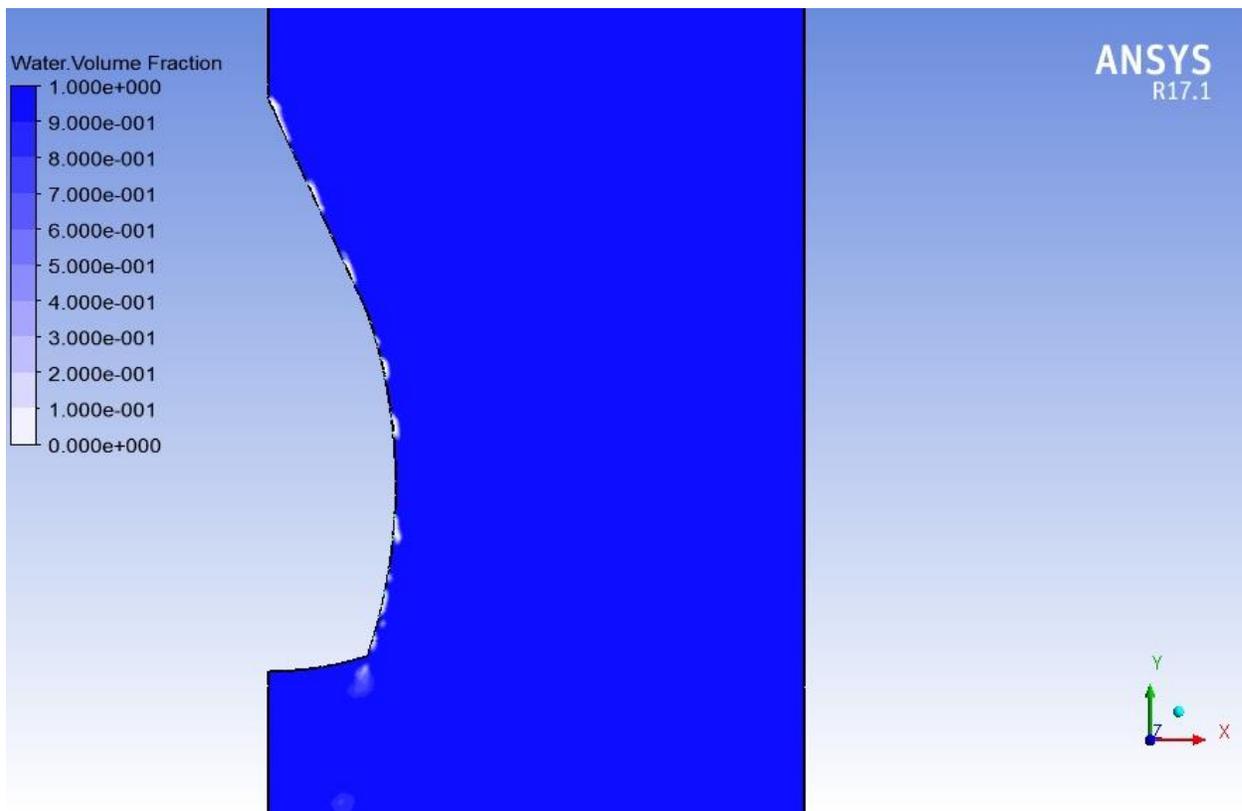


Figura 4.2: Diagrama de fases del Modelo 1 (Velocidad de 1,3 [m/s])

Tabla 12: Reporte de fases de los elementos del Modelo 1

Sección	N° de elementos cubiertos por aire	N° total de elementos	% de elementos cubiertos por aire
<i>Delantera</i>	46	100	46,0
<i>Lateral</i>	36	118	30,5
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	82	250	32,8

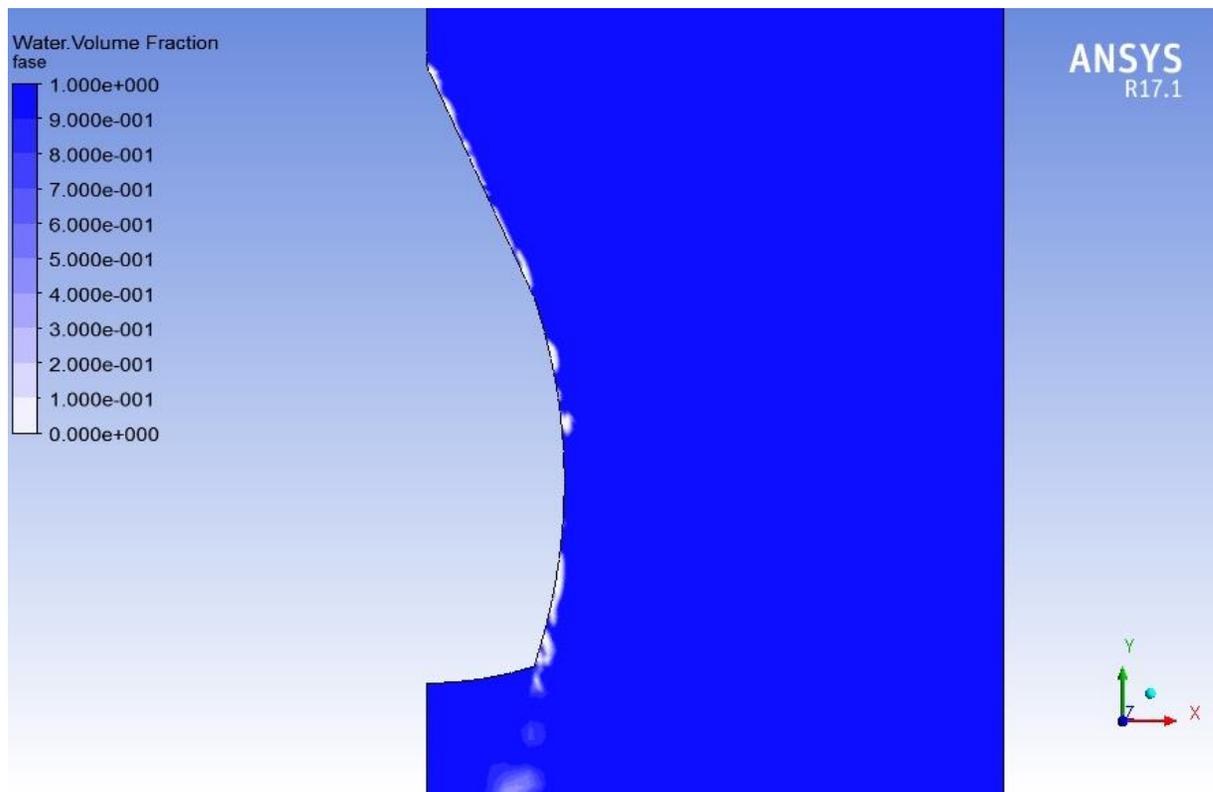


Figura 4.3: Diagrama de fases del Modelo 4 (Velocidad de 2,2 [m/s])

Tabla 13: Reportes de fase de los elementos del Modelo 4

Sección	N° de elementos cubiertos por aire	N° total de elementos	% de área cubierta por aire
<i>Frontal</i>	66	100	66,0
<i>Lateral</i>	46	118	39,7
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	112	250	44,8

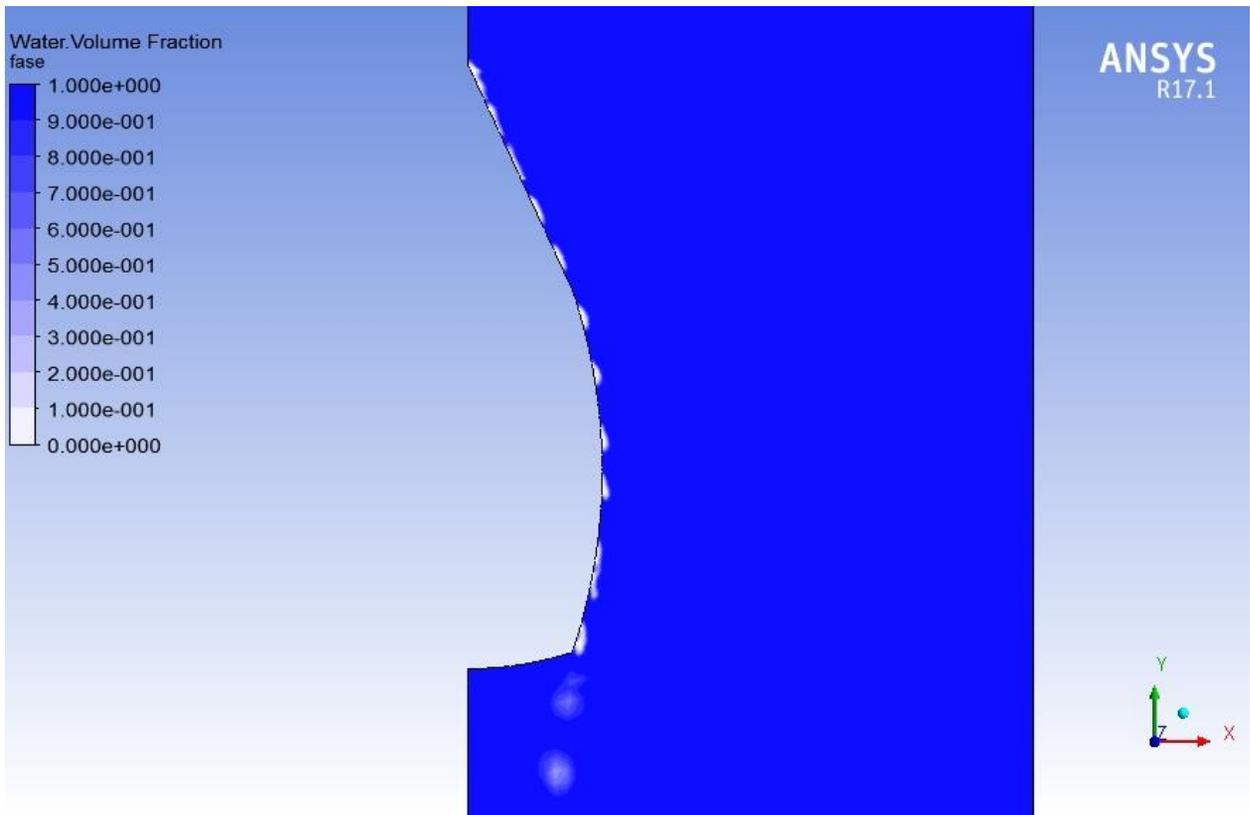


Figura 4.4 Diagrama de fases Modelo 7 (Velocidad de 3,1 [m/s])

Tabla 14: Reportes de fase de los elementos del Modelo 7

Sección	N° de elementos cubiertos por aire	N° total de elementos	% de área cubierta por aire
<i>Frontal</i>	66	100	66,0
<i>Lateral</i>	48	118	40,7
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	114	250	45,6

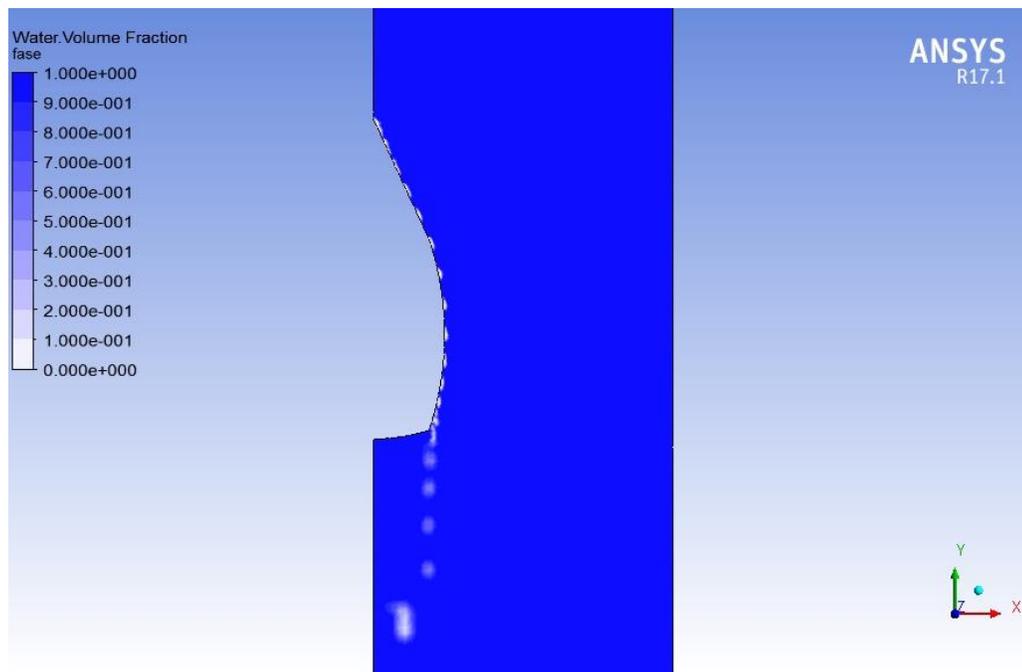


Figura 4.5: Diagrama de fases del Modelo 10 (Velocidad de 4,0 [m/s])

Tabla 15: Reportes de fase de los elementos del Modelo 10

Sección	N° de elementos cubiertos por aire	N° total de elementos	% de área cubierta por aire
<i>Frontal</i>	60	100	60,0
<i>Lateral</i>	62	118	52,5
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	102	250	40,8

Se los diagramas se aprecia que a mayores velocidades se alcanza una mejor lubricación en base de aire, puesto que hay un total de elementos de aire cubriendo la pared del barco mayor que a bajas velocidades. Es importante destacar que la velocidad de inyección de aire mantuvo la relación descrita por la ecuación (6) para cada uno de los modelos. La mayor concentración de elementos de aire se observan en la zona frontal, además se observa un desprendimiento de la capa de aire conforme aumenta la velocidad del fluido en el contorno del barco, dejando una capa de burbujas intermitente en cada uno de los modelos. Notar además que esta capa intermitente es más fina a velocidades mayores, sin embargo el porcentaje de elementos en la pared del barco cubiertos por aire es mayor. Finalmente no se logra recubrimiento de aire en la zona trasera en ningún caso.

4.3 Análisis Capa Límite

En esta sección se exponen las de velocidades experimentadas por los elementos de agua en el volumen de control, permitiendo ver el comportamiento de la capa límite en los casos SIA y compararlos con CIA. Para cada caso se posee un diagrama de contornos que indican la magnitud de la velocidad en m/s y una segunda imagen con los vectores indicando la dirección y sentido en que se mueven el flujo. En los diagramas de contornos se aprecia una sección celeste y azul en la estela trasera y una secciona naranja claro y naranja oscuro en la capa limite lateral, las zonas más oscuras son las zonas donde el región cambia a estado turbulento debido a la diferencia de velocidades entre esa zona y su alrededor formando vórtices. A continuación se estudia el cambio de tamaño de estas secciones entre los modelos SIA y CIA.

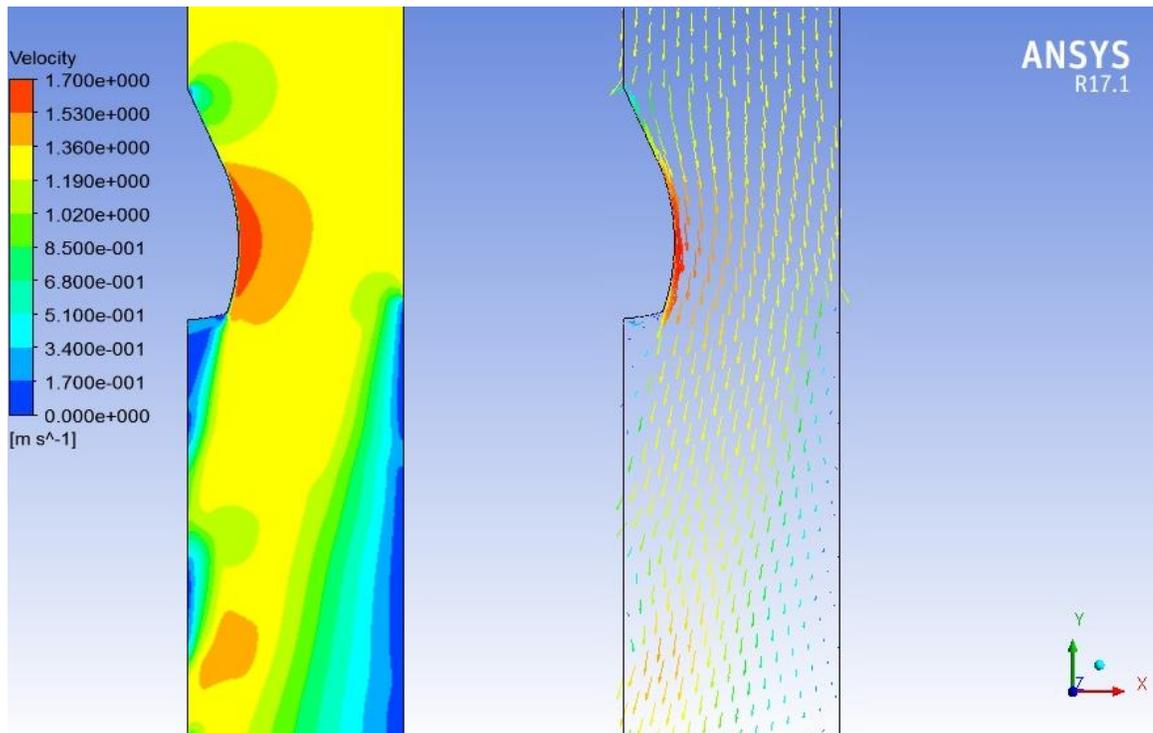


Figura 4.6: Capa límite del Modelo 1 SIA

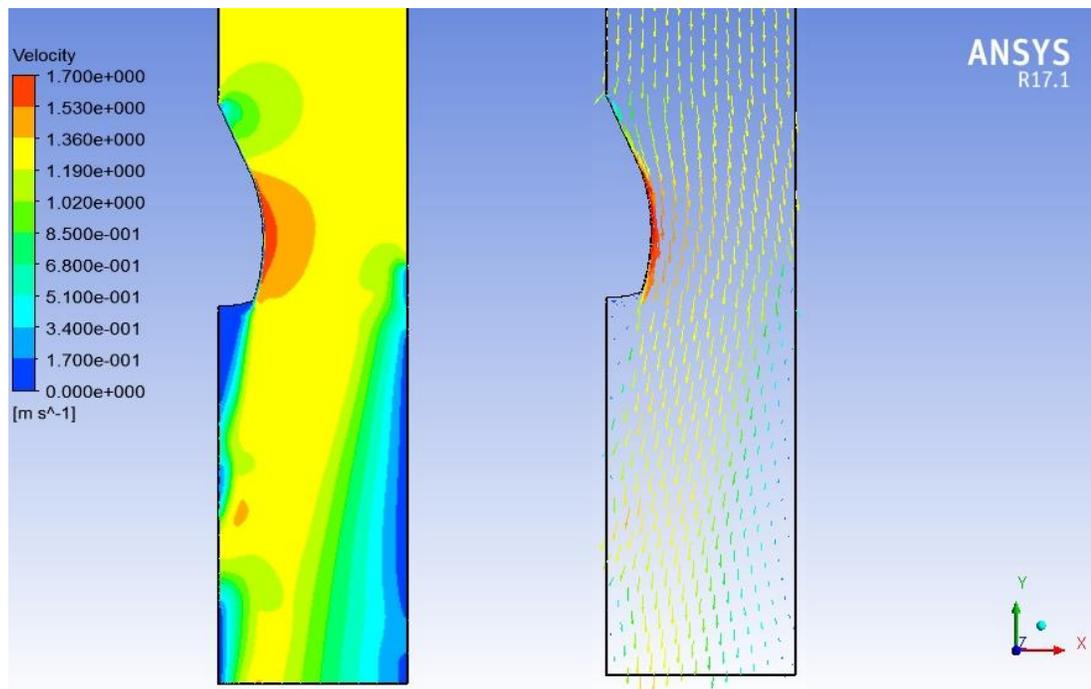


Figura 4.7: Capa Límite del modelo 1CIA

Tabla 16: Dimensiones capa límite Modelo 1

Sección Capa Limite	SIA	CIA
<i>Largo estela trasera turbulenta</i>	2,48	1,95
<i>Ancho estela trasera turbulenta</i>	0,62	0,56
<i>Largo estela trasera laminar</i>	2,79	2,23
<i>Ancho estela trasera laminar</i>	0,52	0,65
<i>Grosor capa limite lateral turbulenta</i>	0,41	0,37
<i>Grosor capa limite lateral laminar</i>	1,65	1,12

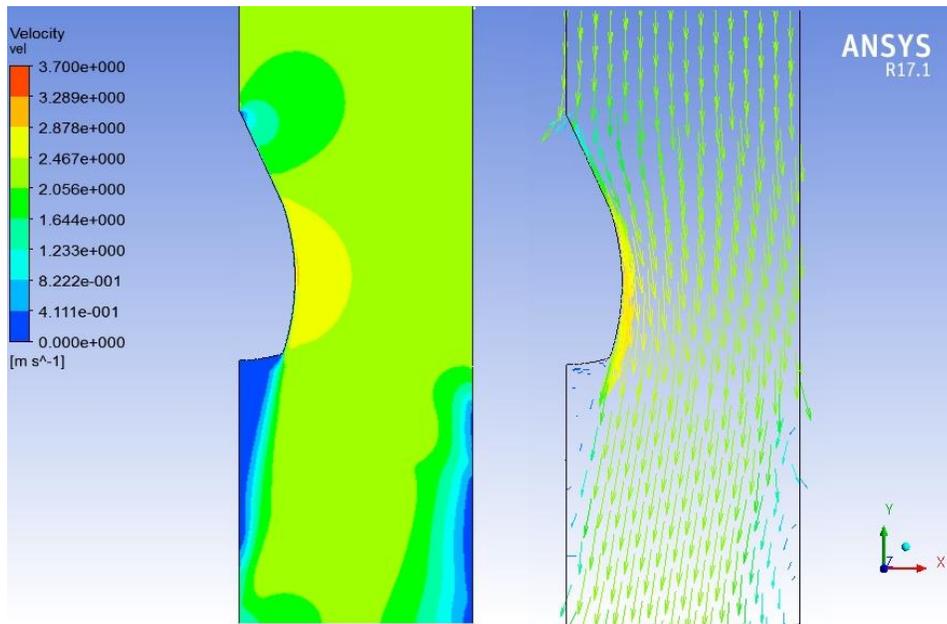


Figura 4.8: Capa límite del Modelo 4SIA

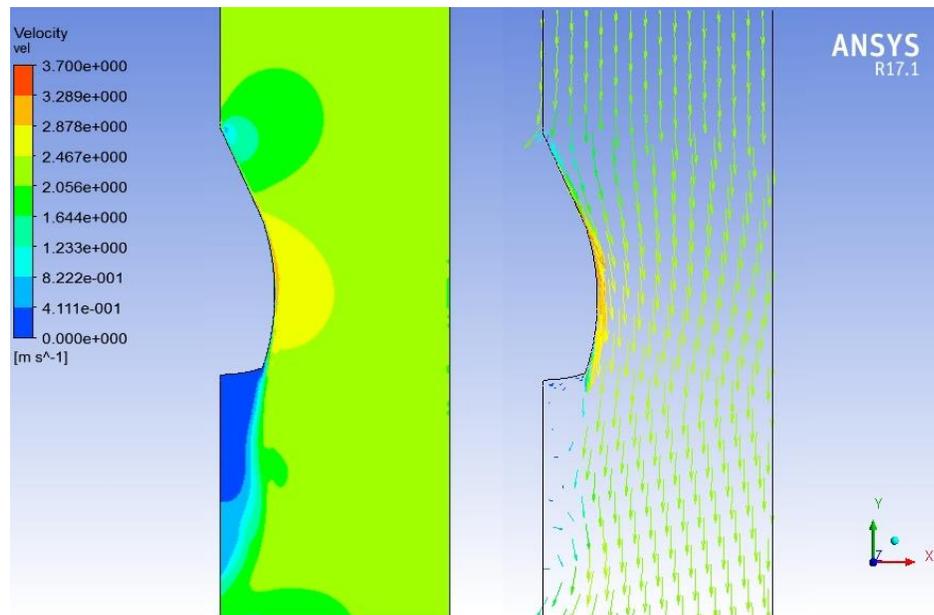


Figura 4.9: Capa límite del Modelo 4 CIA

Tabla 17: Dimensiones capa límite Modelo 4

Sección Capa Limite	SIA	CIA
<i>Largo estela trasera turbulenta</i>	4,01	2,25
<i>Ancho estela trasera turbulenta</i>	0,74	0,52
<i>Largo estela trasera laminar</i>	4,32	3,54
<i>Ancho estela trasera laminar</i>	0,84	0,69
<i>Grosor capa limite lateral turbulenta</i>	0,11	0,09
<i>Grosor capa limite lateral laminar</i>	1,27	1,04

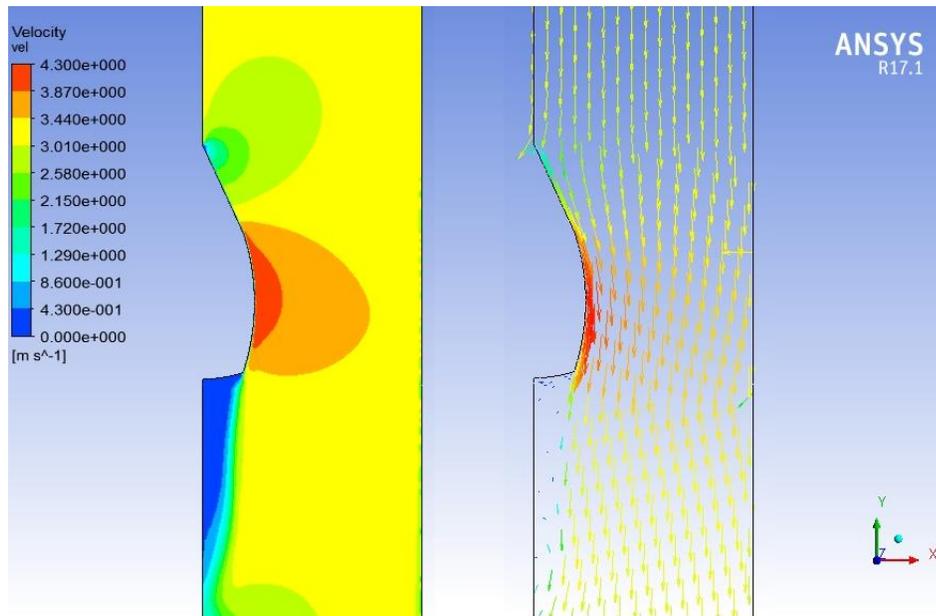


Figura 4.10: Capa límite del Modelo 7 SIA

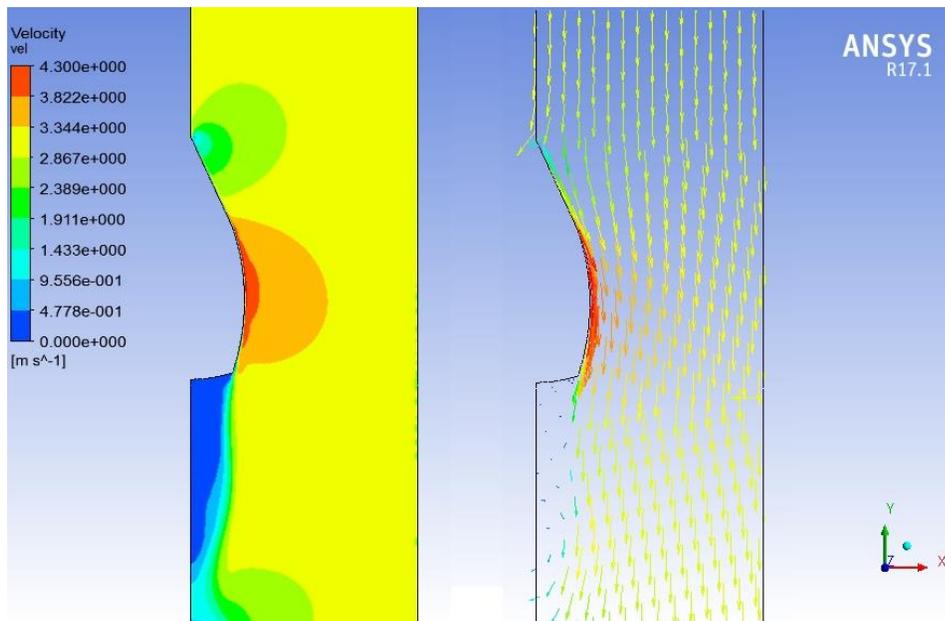


Figura 4.11: Capa límite del Modelo 7 CIA

Tabla 18: Dimensiones capa límite Modelo 7

Sección Capa Limite	SIA	CIA
<i>Largo estela trasera turbulenta</i>	3,54	3,37
<i>Ancho estela trasera turbulenta</i>	0,78	0,60
<i>Largo estela trasera laminar</i>	4,41	3,80
<i>Ancho estela trasera laminar</i>	0,86	0,69
<i>Grosor capa limite lateral turbulenta</i>	0,60	0,35
<i>Grosor capa limite lateral laminar</i>	2,59	1,47

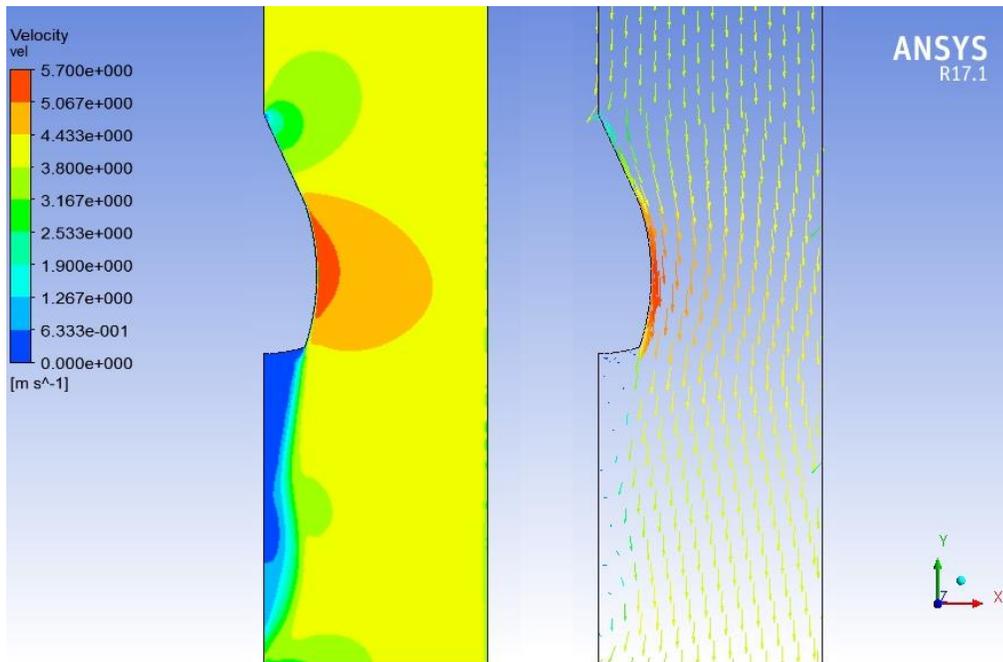


Figura 4.12: Capa límite del Modelo 10SIA

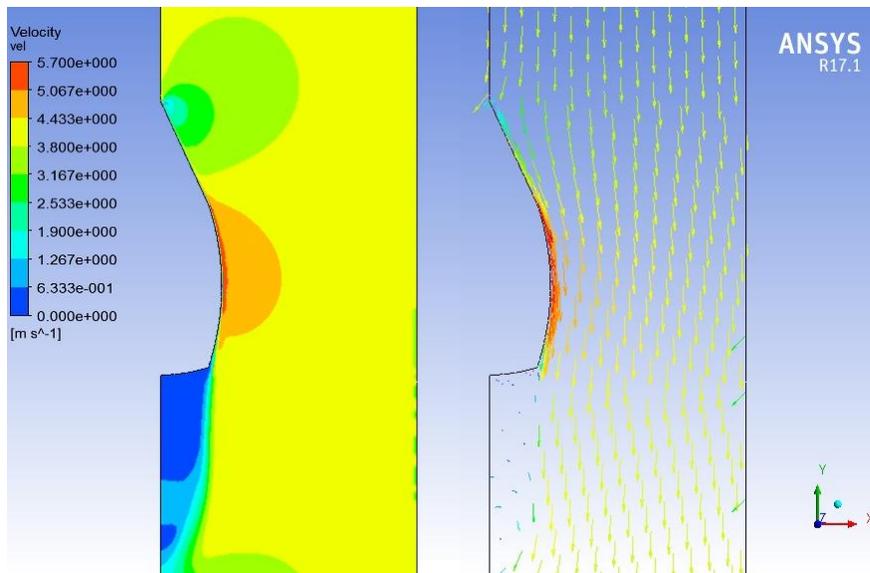


Figura 4.13: Capa límite del Modelo 10 CIA

Tabla 19: Dimensiones capa límite Modelo 10

Sección Capa Limite	SIA	CIA
<i>Largo estela trasera turbulenta</i>	3,65	2,07
<i>Ancho estela trasera turbulenta</i>	0,59	0,89
<i>Largo estela trasera laminar</i>	4,74	3,75
<i>Ancho estela trasera laminar</i>	0,69	0,99
<i>Grosor capa limite lateral turbulenta</i>	0,40	0,10
<i>Grosor capa limite lateral laminar</i>	1,98	1,19

Se puede apreciar tanto gráficamente como en las tablas, que el grosor de capa límite lateral disminuye en presencia de inyección de aire debido principalmente al efecto Marcus que se genera con las burbujas que viajan en por la pared del barco.

También se observa que de la estela trasera, disminuye en largo, sin embargo para modelos más rápidos el grosor de la estela trasera aumenta (caso del modelo 10), lo cual es muy conveniente para la creación de próximos modelos, puesto la forma de la estela indica la geometría que debiese tener el barco en la sección trasera para convertirse en un objeto hidrodinámico, por lo que mientras más pequeña sea dicha estela, menores son las modificaciones de la geometría del barco.

4.4 Análisis de Esfuerzos.

En este capítulo se exponen los datos obtenidos de las simulaciones en cuanto a esfuerzos tangenciales y esfuerzos normales, se pueden observar gráficos de esfuerzos y presión, según la posición del elemento respecto del barco, mientras que al final del capítulo se observa la reacción total sufrida por la pared del barco, con su respectivo diagrama de magnitud y diagrama de vectores.

4.4.1 Debido a la Presión

En los gráficos de presión dinámica, se aprecia en color rojo los elementos correspondientes a sección frontal, en color naranja los elementos que corresponden a la sección lateral, en blanco la sección frontal y el resto de los colores son secciones auxiliares que facilitan el estudio, en azul se encuentra el punto medio de la sección frontal, en morado la mitad de la sección lateral, mientras que amarilla y celeste son el cambio de sección entre frontal y lateral.

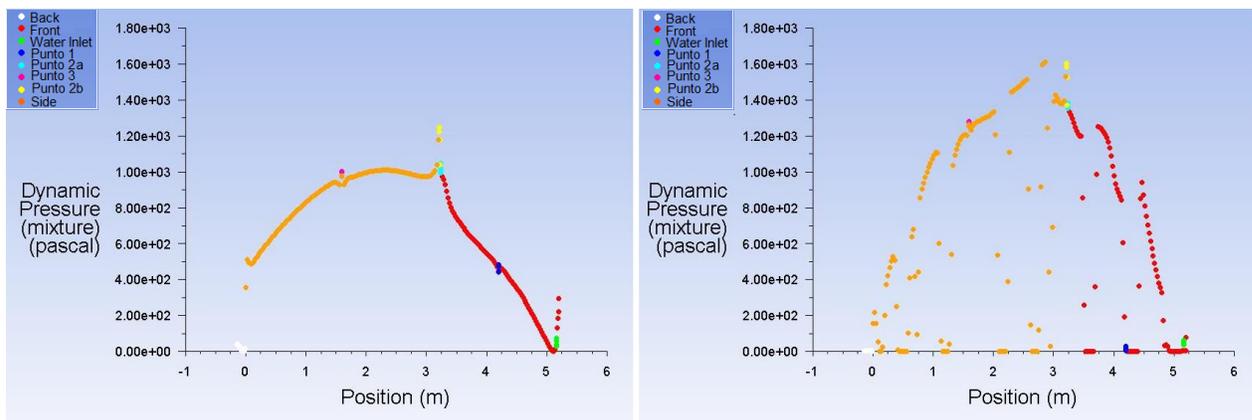


Figura 4.14: Grafico de Presión Dinámica para el modelo 1 SIA (a la Izquierda)

Y CIA (a la Derecha).

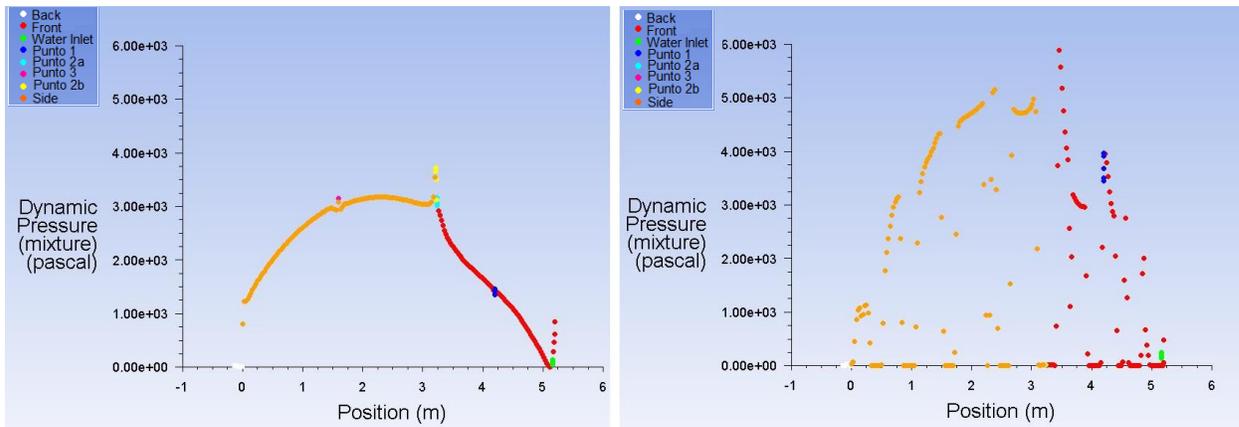


Figura 4.15: Grafico de Presión Dinámica para el modelo 4 SIA (a la Izquierda) y CIA (a la Derecha)

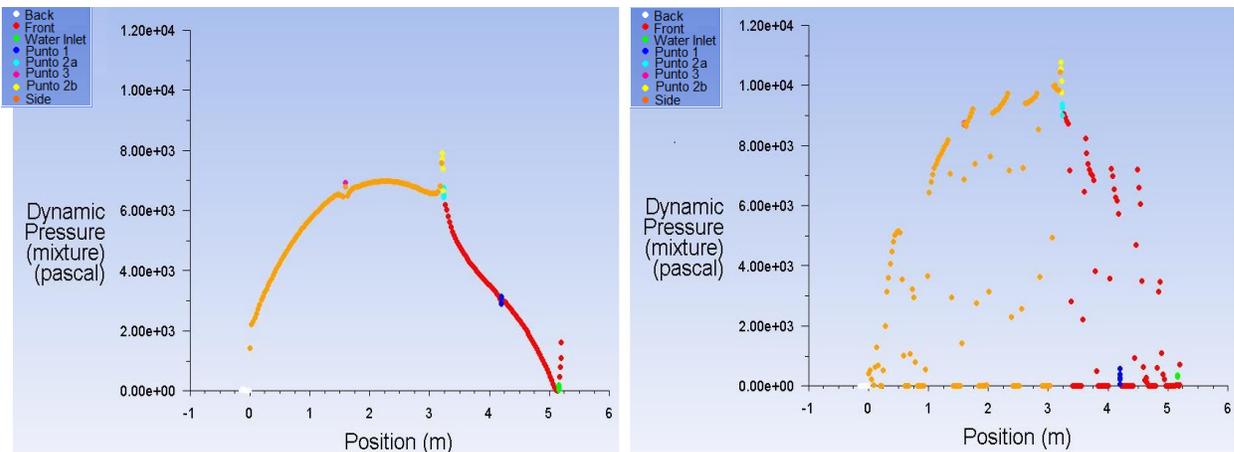


Figura 4.16: Grafico de Presión Dinámica para el modelo 7 SIA a la Izquierda y CIA a la Derecha

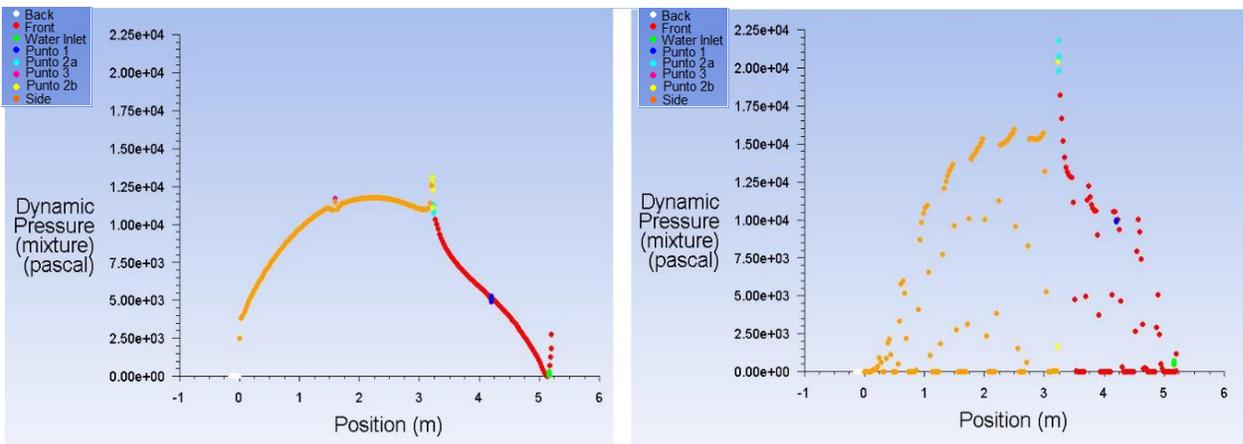


Figura 4.17: Grafico de Presión Dinámica para el modelo 10 SIA (a la Izquierda) y CIA (a la Derecha).

Al comparar los gráficos SIA y CIA se puede observar que las presiones sufren un decaimiento radical en las secciones cubiertas por aire, mientras que en las secciones cubiertas por agua experimentan un aumento parcial, esto se debe al Efecto Magnus que se genera productos de la capa intermitente de aire que se genera en las paredes del barco. A medida que aumenta la velocidad de los modelos, solo se aprecia un aumento en la escala de estos efectos.

Finalmente se aprecia también que la sección con mayor presión dinámica es la mitad superior de la sección lateral. Cabe mencionar que el efecto magnus por si solo aumentaría la presión dinámica en las paredes, sin embargo al combinarlo con las secciones cubiertas por aire, se vuelve favorable puesto que las secciones cubiertas por burbujas tienden a disminuir la presión ejercida sobre la pared.

4.4.2 Debido a esfuerzos tangenciales

En los gráficos de esfuerzos de corte, se aprecia en color rojo los elementos correspondientes a sección frontal, en color naranja los elementos que corresponden a la sección lateral, en blanco la sección frontal y el resto de los colores son secciones auxiliares que facilitan el estudio, en azul se encuentra el punto medio de la sección frontal, en morado la mitad de la sección lateral, mientras que amarilla y celeste son el cambio de sección entre frontal y lateral.

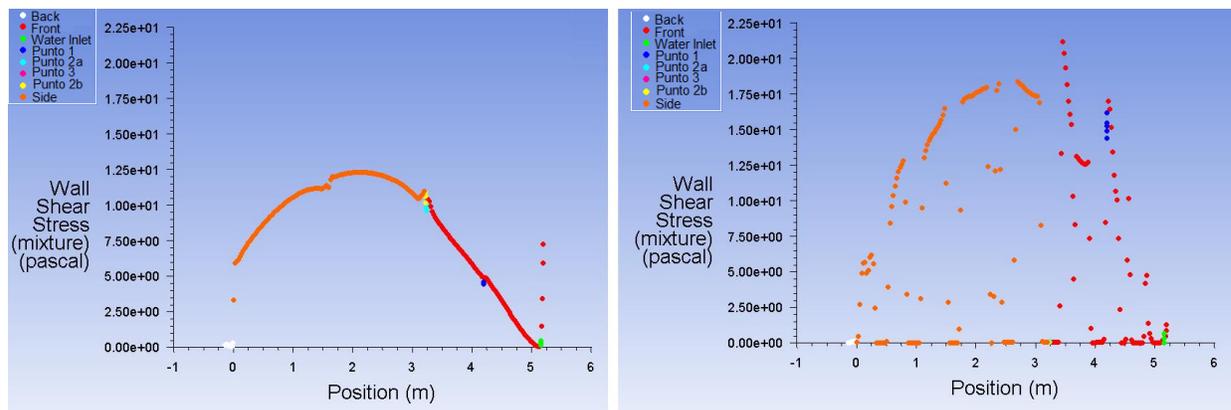


Figura 4.18: Grafico de esfuerzos tangenciales para el modelo 4 SIA a la Izquierda y CIA a la Derecha

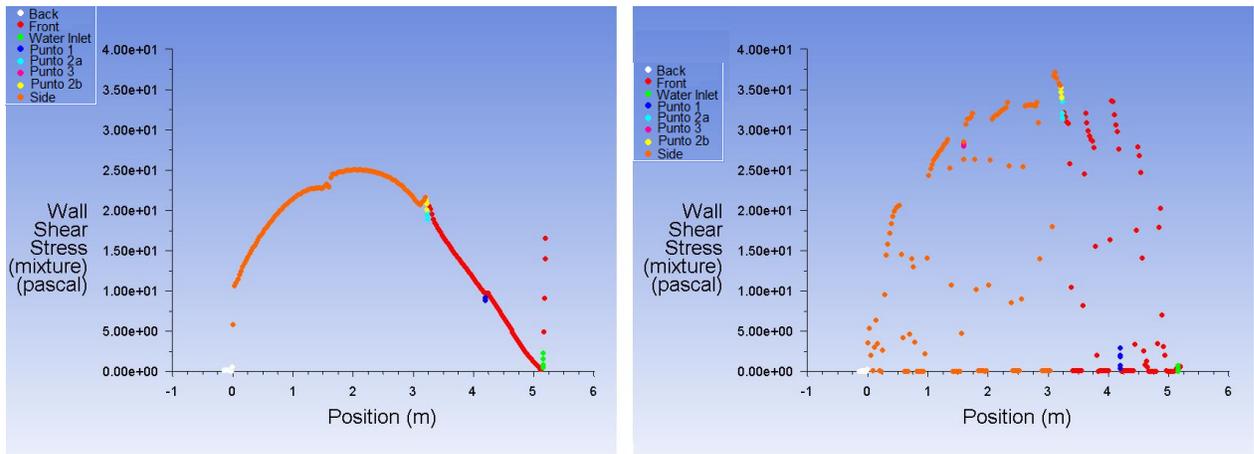


Figura 4.19: Grafico de Esfuerzos Tangenciales para el modelo 7 SIA a la Izquierda y CIA a la Derecha

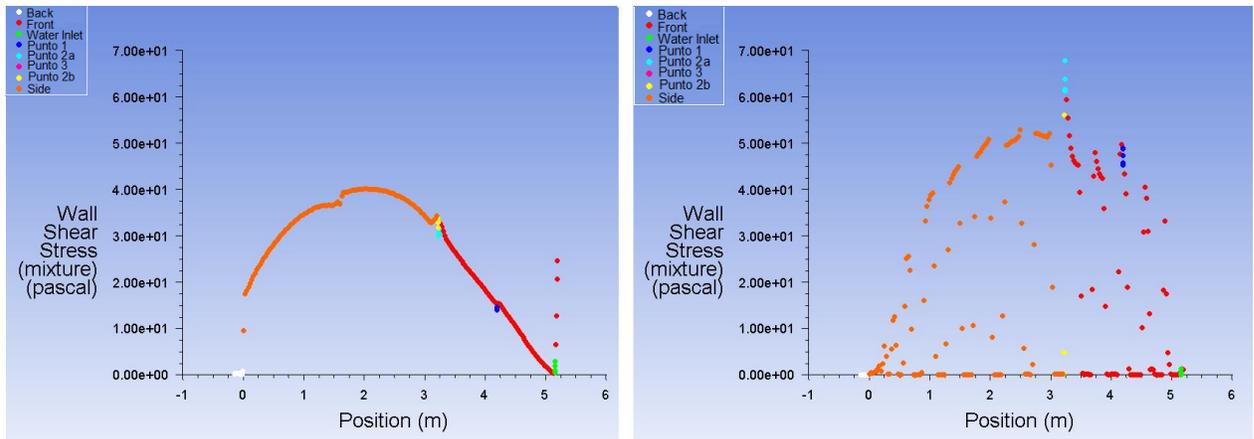


Figura 4.20: Grafico de Esfuerzos de corte para el modelo 10 SIA a la (Izquierda) y CIA (a la Derecha).

De igual manera que en el capítulo anterior, se aprecia una reducción radical en las secciones cubiertas por aire, mientras que las secciones cubiertas por agua sufren un aumento parcial respecto de los modelos SIA. En comparación al capítulo anterior, los esfuerzos tangenciales se comportan de la misma forma que la presión dinámica, pero a menor escala. Nuevamente se observa un aumento proporcional a la velocidad de operación del barco, y la zona de mayor concentración de esfuerzos es la mitad superior de la sección lateral.

4.4.3 Concentración de Esfuerzos Totales

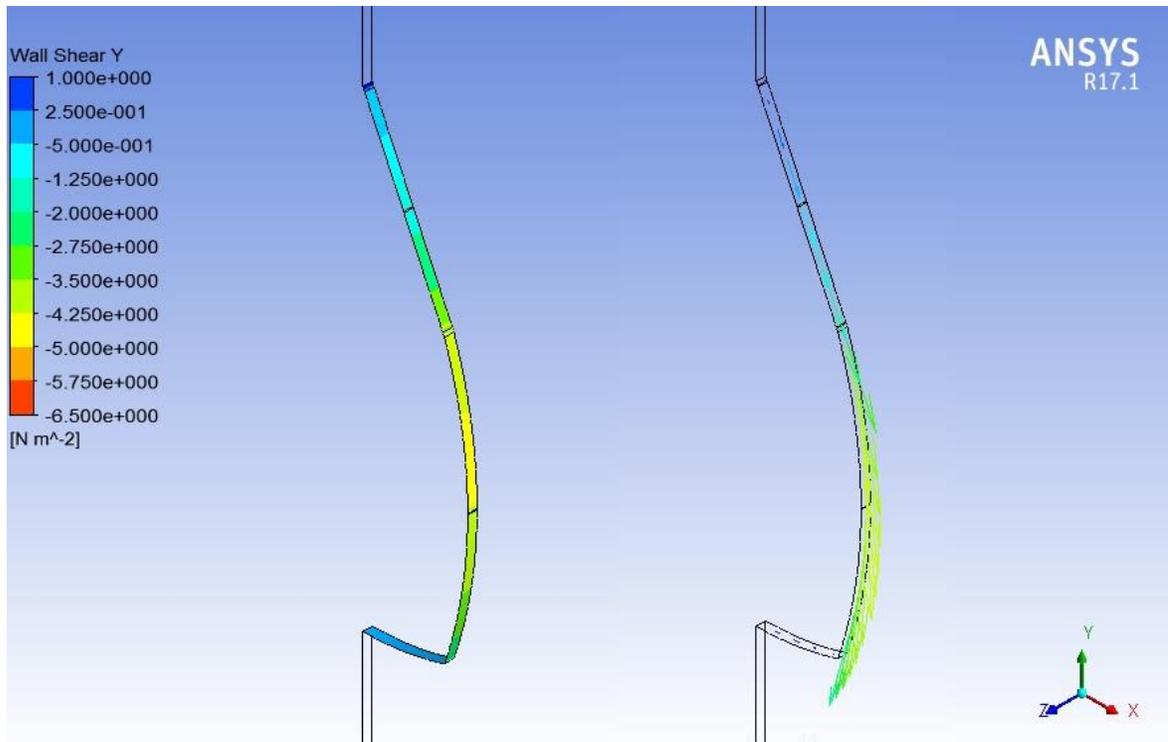


Figura 4.21: Concentración de Esfuerzos del Modelo 1 SIA

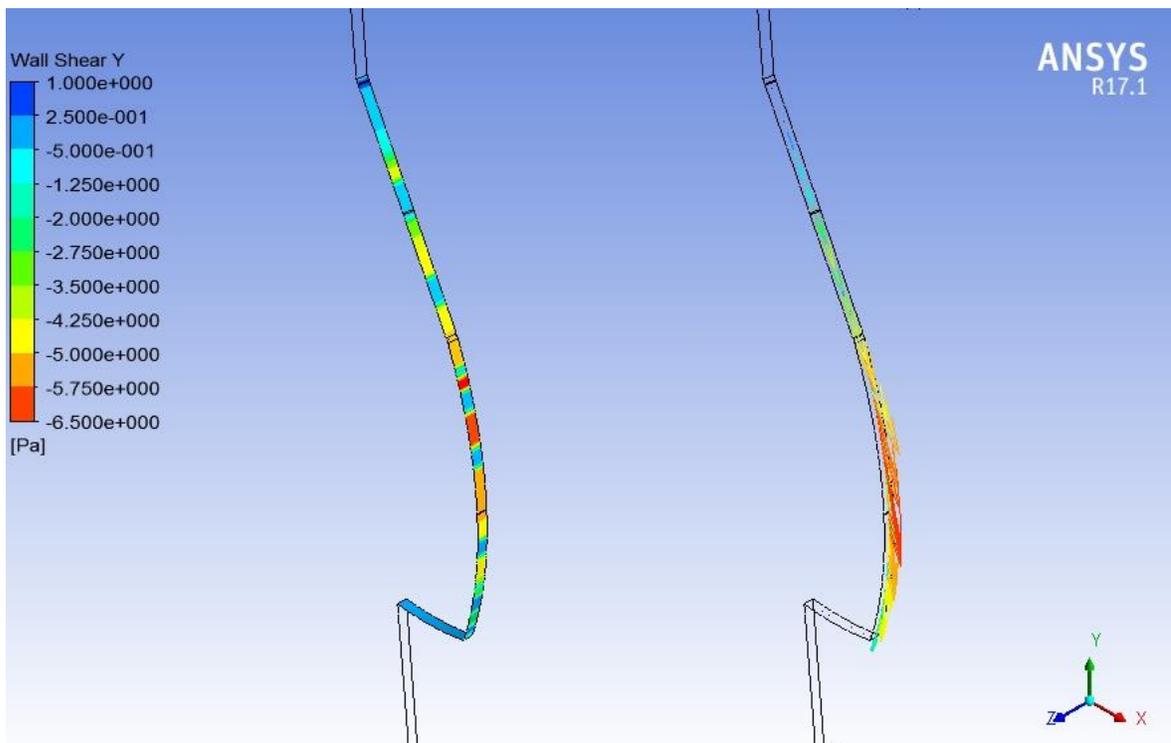


Figura 4.22: Concentración de Esfuerzos del Modelo 1 CIA

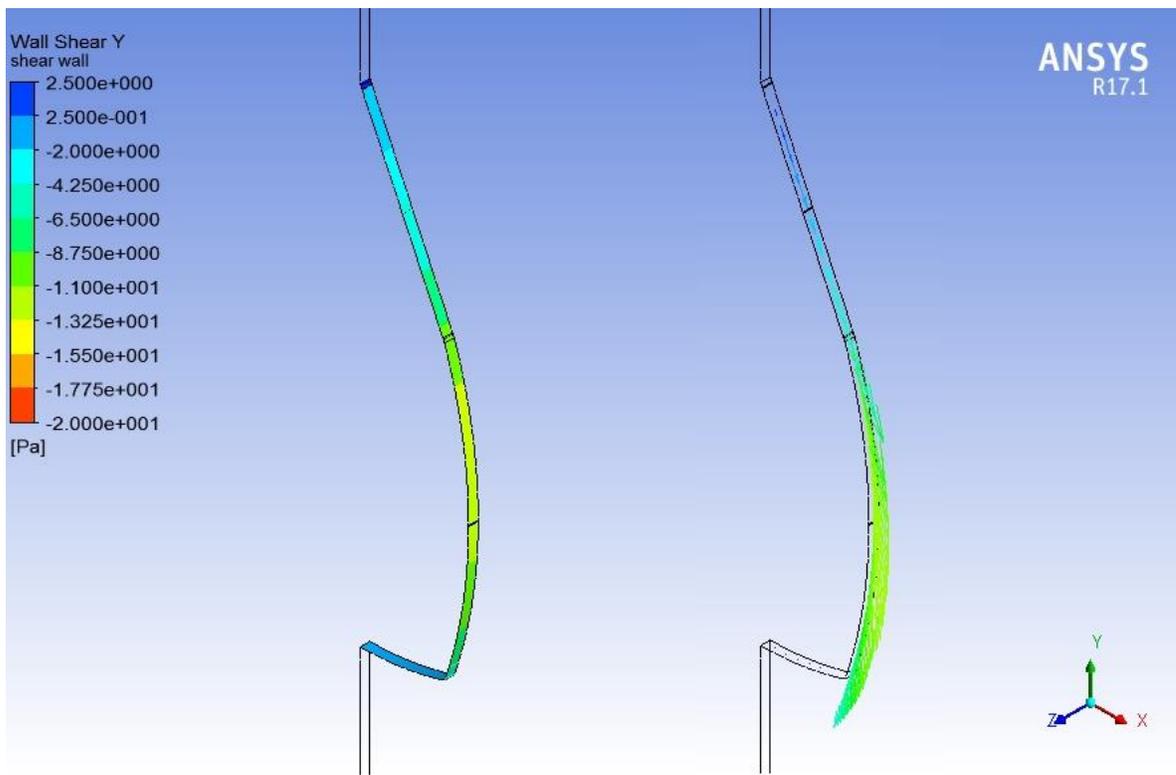


Figura 4.23: Concentración de Esfuerzos del Modelo 4 SIA

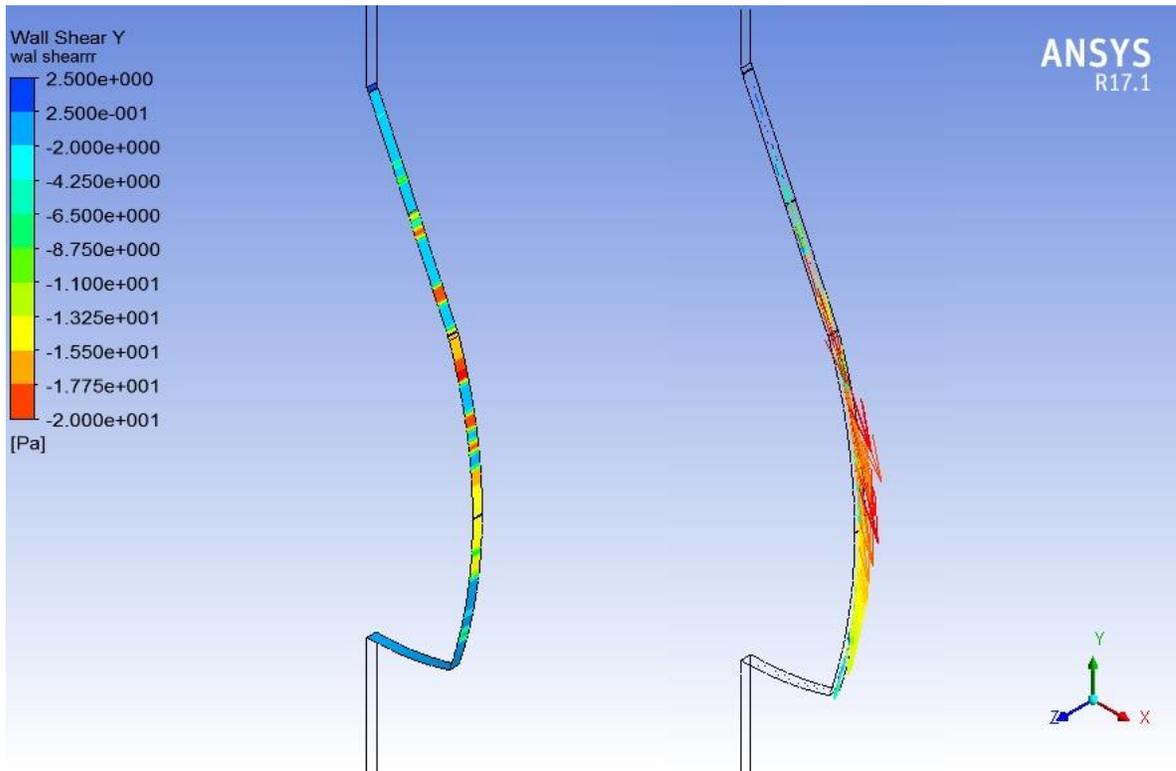


Figura 4.24: Concentración de Esfuerzos del Modelo 4 CIA

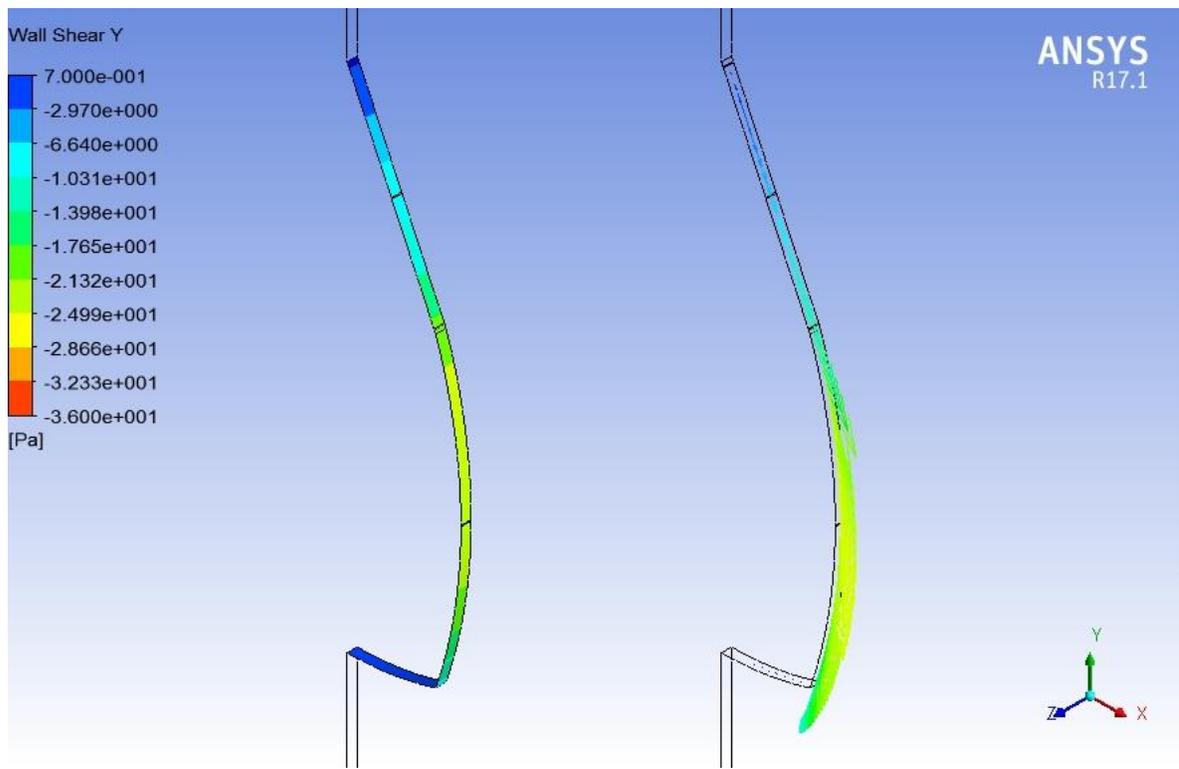


Figura 4.25: Concentración de Esfuerzos del Modelo 7 SIA

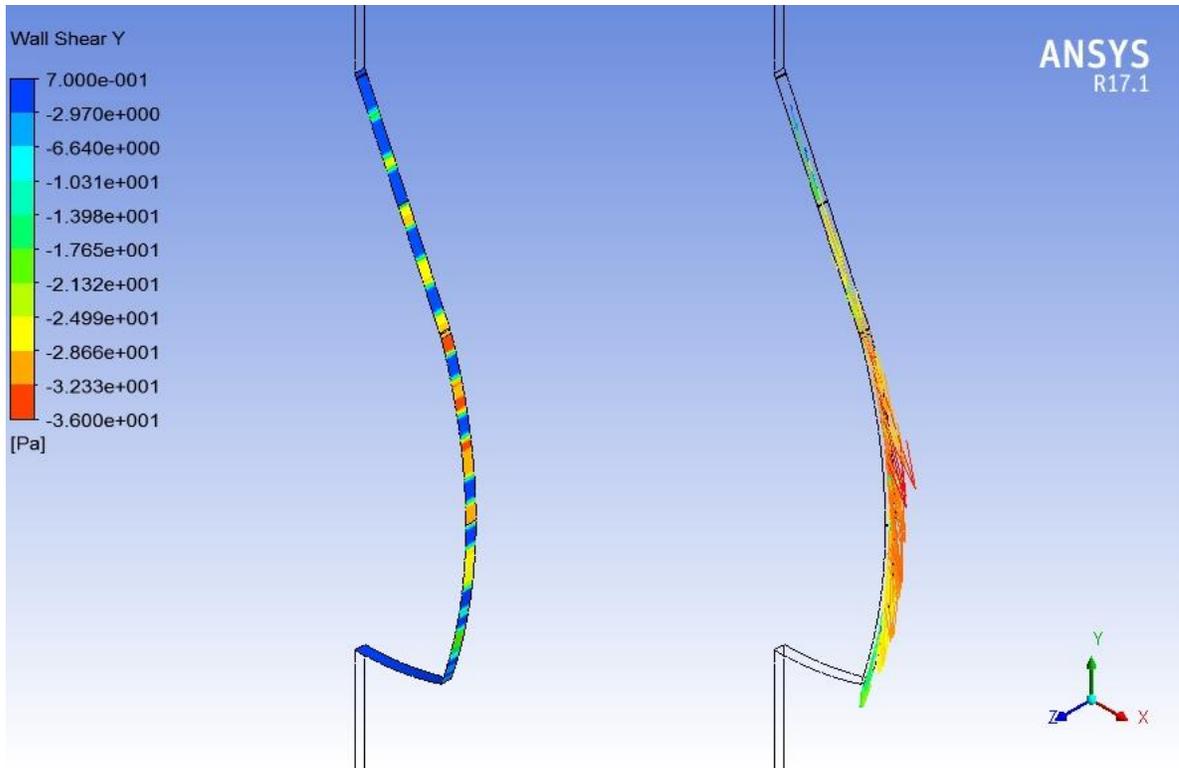


Figura 4.26: Concentración de Esfuerzos del Modelo 7 CIA

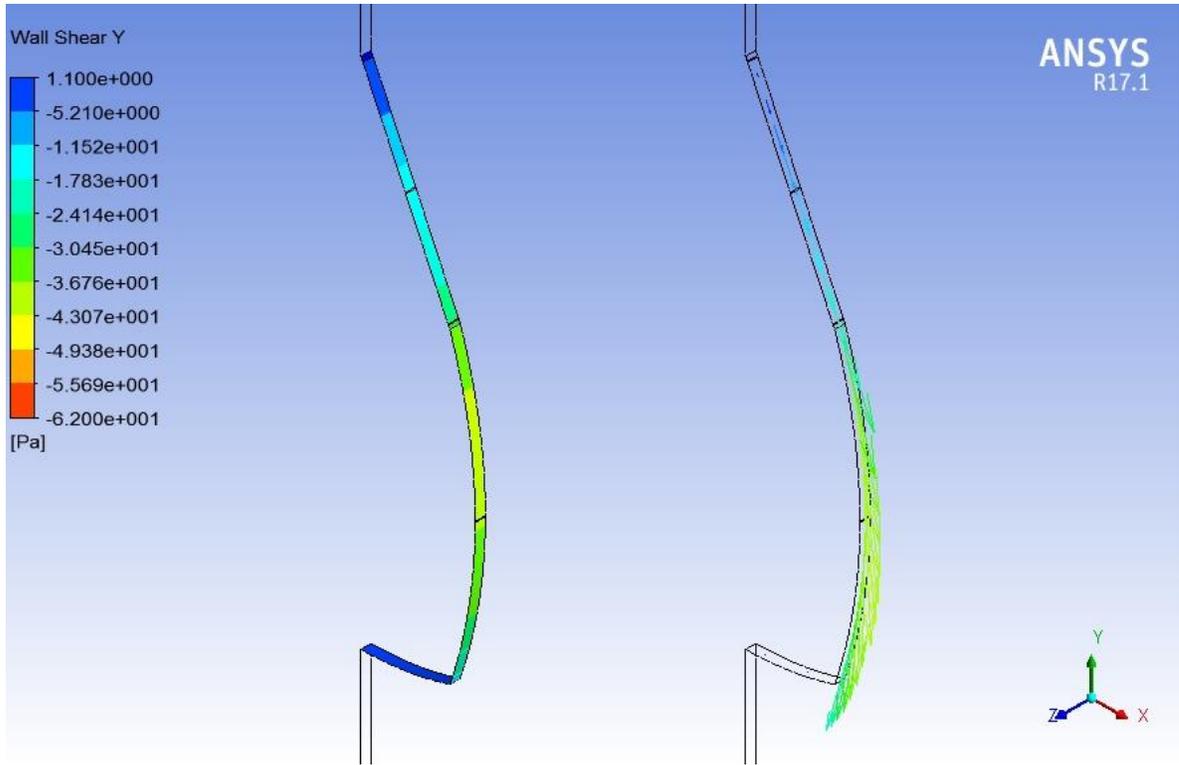


Figura 4.27: Concentración de Esfuerzos del Modelo 10 SIA

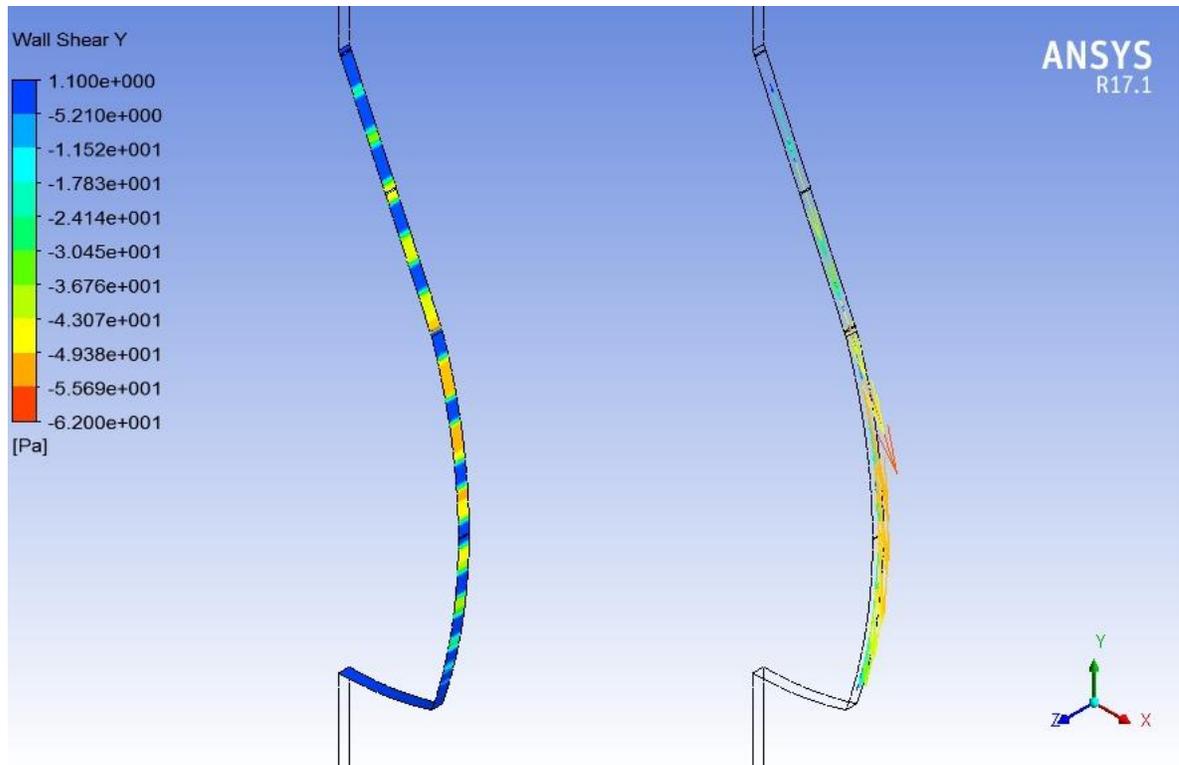


Figura 4.28: Concentración de Esfuerzos del Modelo 10 CIA

Se aprecia nuevamente el comportamiento de las reacciones de la pared frente a una capa de burbujas discontinua sobre la pared, de esta sección se afirma que si la ponderación neta entre áreas con aumento y disminución de esfuerzos es menor que los esfuerzos netos concentrados en los modelos SIA, entonces la inyección de aire es conveniente, puesto que indicaría que el mismo modelo viaja a la misma velocidad experimentando una resistencia menor. En el siguiente capítulo se cuantifica esta afirmación.

4.5 Resumen de resultados obtenidos

A continuación se separan los resultados obtenidos por sección para finalmente obtener un resultado neto de la potencia requerida para mantener el barco navegando a velocidad constante.

4.5.1 Resultados Área Frontal

Tabla 20: Resultados de Fuerzas Obtenidos por ANSYS del Área Frontal

Velocidad del modelo [m/s]	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
<i>Fuerza Tan SIA [N]</i>	0,001	0,518	0,721	0,945	1,243	1,545	1,860	2,200	2,568	2,961
<i>Fuerza Tan CIA [N]</i>	0,001	0,796	0,828	1,019	1,386	1,585	2,209	2,209	2,836	3,790
<i>Fuerza Nor SIA [N]</i>	108	165	241	326	447	567	839	839	996	1167
<i>Fuerza Nor CIA [N]</i>	125	214	248	292	390	397	626	704	841	1107

La Tabla 20 muestra los resultados de fuerza en Newton que entregaron los modelos SIA y CIA a diferentes velocidades, siendo estas fuerzas las reacciones soportadas por la pared del barco en la sección frontal. Es importante destacar que la fuerza tangencial no es significativa en comparación a la fuerza normal, sin embargo se consideró de todas formas para los siguientes cálculos.

Tabla 21: Aproximaciones y resultados sección frontal (Valor de $C_d=0,76$ $K_{TUR}(1.e)=0,6$)

Velocidad del modelo [m/s]	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
<i>W_{CAL1}[W] (1)*</i>	319	570	922	1390	1988	2730	3631	4703	5959	7412
<i>W_{CAL2}[W] (1.4)*</i>	77	143	240	372	546	767	1040	1373	1769	2235
<i>W_{FRONT SIA}[W]</i>	140	264	459	719	1120	1591	2164	2861	3695	4679
<i>W_{FRONT CIA}[W]</i>	163	344	474	644	979	1116	1948	2401	3122	4442
Reducción Lograda [%]	-16,3	-30,2	-3,2	10,4	12,5	29,9	10,0	16,1	15,5	5,1

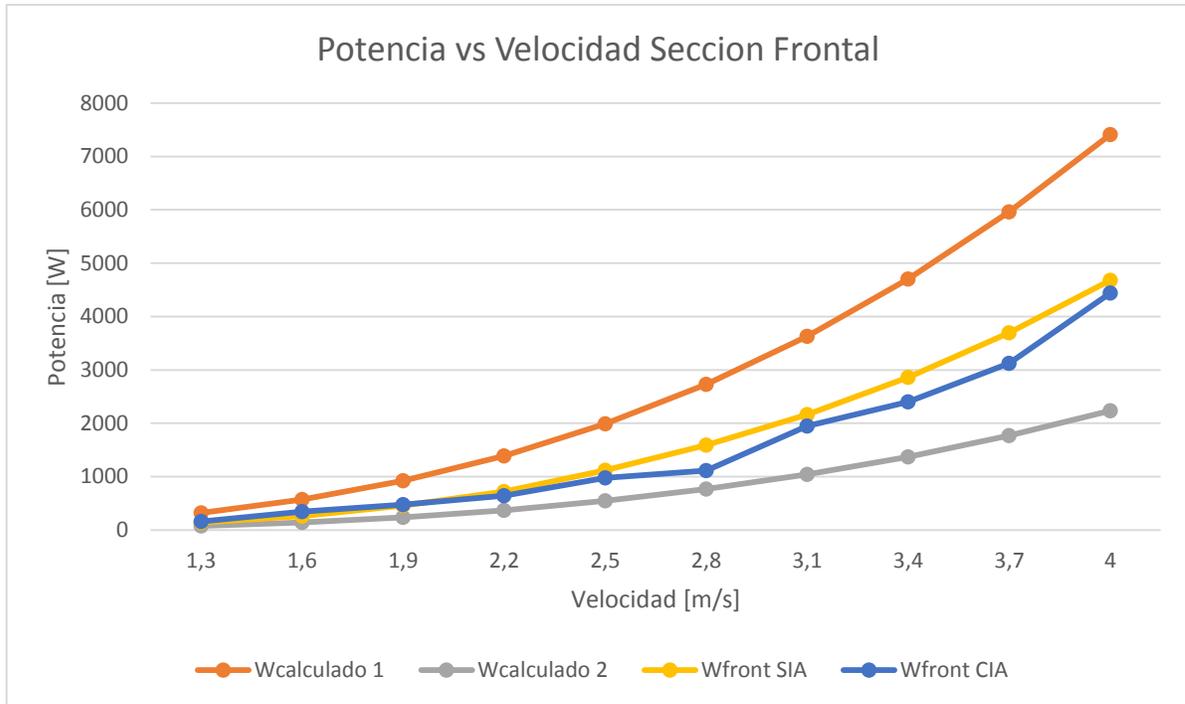


Gráfico 1: Potencia vs Velocidad Sección Frontal

Se aprecia en color amarillo los resultados para los modelos SIA, en naranja la aproximación utilizando la ecuación (1.4), en gris el resultado esperado utilizando ecuación (1) y en azul el resultado obtenido del modelo CIA. Puesto que los resultados obtenidos se encuentran dentro de él margen estimado, se considera que la simulación es válida.

De la sección frontal se puede observar que no hay una clara tendencia a la reducción de potencia, puesto que incluso se observa un aumento en los primeros modelos.

4.5.2 Resultado Sección Lateral

Similar a sección anterior, se exponen los resultados obtenidos en la sección lateral.

Tabla 22: Resultados de Fuerzas Obtenidas por ANSYS de la Sección Lateral

Velocidad del Modelo [m/s]	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
<i>Fuerza Tan SIA [N]</i>	3,2E ⁻⁰³	1,8	2,6	3,4	4,6	5,7	6,9	8,2	9,6	11,1
<i>Fuerza Tan CIA [N]</i>	3,1E ⁻⁰³	1,3	2,2	2,8	3,2	4,4	5,3	5,3	6,4	6,4
<i>Fuerza Nor SIA [N]</i>	442	652	887	1229	1561	2333	2333	2773	3264	442
<i>Fuerza Nor CIA [N]</i>	336	573	742	830	1202	1483	1601	1874	1869	336

La *Tabla 1* *Tabla 22* *Tabla 20* muestra los resultados de fuerza en Newton de los modelos SIA y CIA a diferentes velocidades, siendo estas fuerzas las reacciones soportadas por la pared del barco en la sección lateral. Nuevamente la fuerza tangencial no es significativa en comparación a la fuerza normal, sin embargo se considera para los siguientes cálculos.

Tabla 23: Aproximaciones y resultados Sección Lateral (Valor de $C_d=0,76$ y $K_{TUR}=1,1$)

Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_{CAL1}[W]$	590	1056	1708	2575	3683	5059	6727	8712	11039	13732
$W_{CAL2}[W]$	270	503	842	1307	1917	2694	3655	4823	6215	7853
W_{SIDE}										
$SIA[W]$	371	710	1244	1959	3083	4387	5997	7959	10297	13101
W_{FRONT}										
$CIA[W]$	337	540	1092	1639	2082	3377	4613	5461	6959	7503
Reducción lograda [%]	31,0	36,2	29,3	39,7	49,1	30,2	41,4	36,2	38,8	53,4

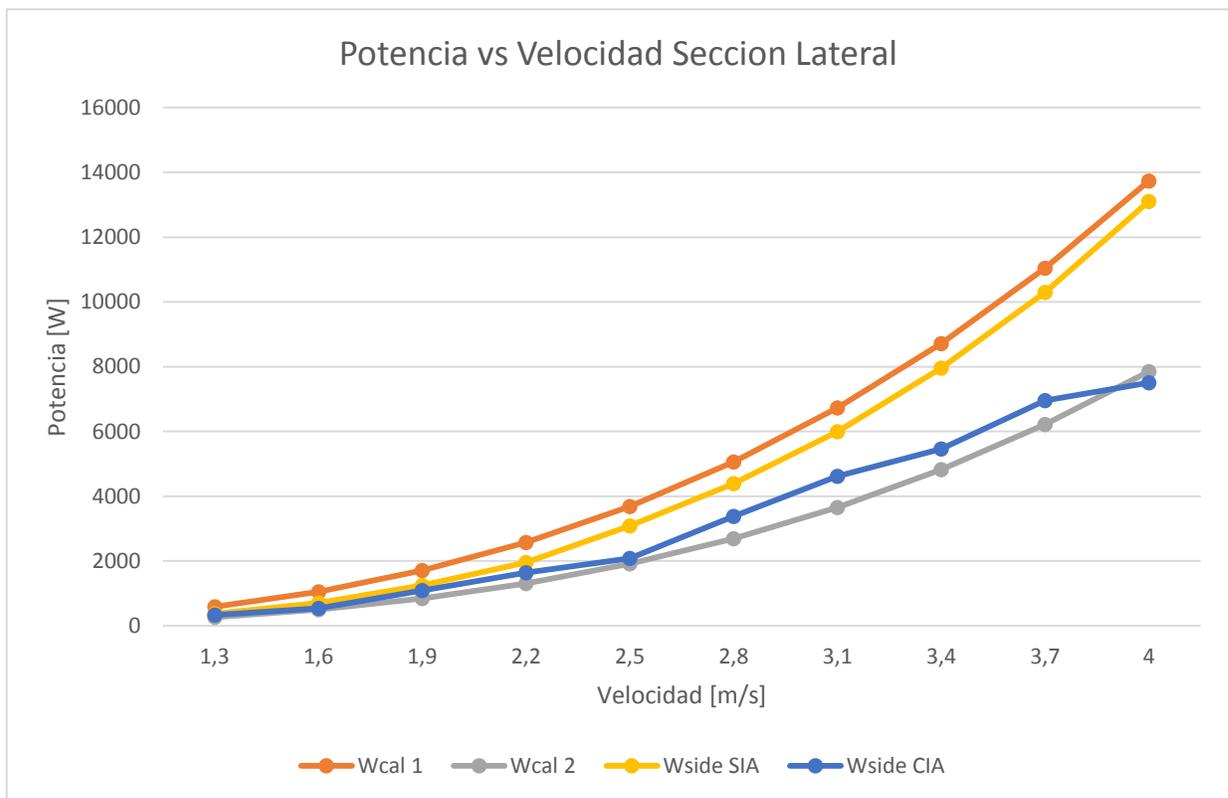


Gráfico 2: Potencia vs Velocidad sección lateral.

Se aprecia del Gráfico 2 que los resultados están dentro del margen esperado, por lo que se considera válido el modelo.

Se obtuvo una reducción mayor a la esperada en el modelo cuya velocidad de movimiento es 4,0[m/s]. Mientras que el resto se mantuvo dentro de los parámetros aproximados. Se

observa además que a medida que se aumenta la velocidad de los modelos se obtiene una mayor reducción de potencia.

4.5.3 Resultado Área Trasera

Tabla 24: Resultados de Fuerzas Obtenidas por ANSYS de la Sección Trasera

Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Fuerza Tan SIA</i> <i>[N]*10⁻³</i>	3,1	5,9	9,3	14,7	18,1	21,9	27,3	32,7	38,5	44,6
<i>Fuerza Tan CIA</i> <i>[N]*10⁻³</i>	0,017	2,5	0,046	0,73	0,82	5,8	18,4	3,3	1,5	0,32
<i>Fuerza Nor SIA [N]</i>	6,9	11,0	10,4	9,3	9,4	11,5	14,5	17,9	20,0	25,9
<i>Fuerza Nor CIA [N]</i>	1,9	2,6	1,9	2,2	2,2	1,1	1,3	4,2	2,8	1,3

La *Tabla 1*Tabla 24 muestra los resultados de fuerza en Newton de los modelos SIA y CIA a diferentes velocidades, siendo estas fuerzas las reacciones soportadas por la pared del barco en la sección trasera. Al igual que las secciones anteriores, las fuerzas tangenciales son menores a las fuerzas normales, sin embargo se consideran para el análisis de potencia neta.

Tabla 25: Aproximaciones y resultados sección trasera (Valor de $C_d=0,76$ y $K_{TUR}=0,07$)

Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_{CAL1}[W]$	8,4	12,2	16,7	21,7	27,4	33,5	40,3	47,6	55,4	63,7
$W_{CAL2}[W]$	14,2	21,5	30,3	40,6	52,4	65,7	80,6	96,9	114,8	134,2
$W_{BACKSIA}[W]$	9,0	17,6	19,7	20,6	23,6	32,4	45,2	61,0	74,2	103,7
$W_{BACKCIA}[W]$	2,5	4,2	3,6	4,8	5,5	3,2	4,0	14,4	10,5	5,1
Reducción Lograda [%]	72,3	76,2	81,5	76,9	76,6	90,0	92,9	76,5	85,9	95,1

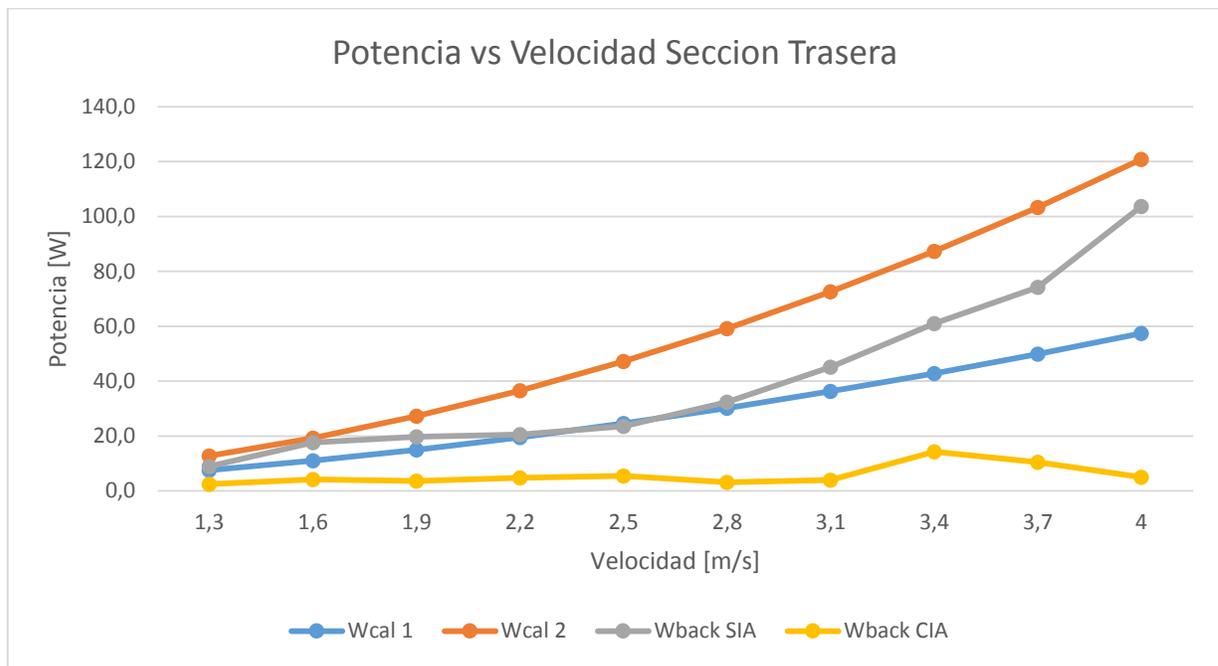


Gráfico 3: Potencia vs Velocidad sección trasera

Se observa del Gráfico 3 que salvo por el modelo 2,5 todos los resultados se encuentran en el margen esperado, también se destaca que para esta sección, las aproximaciones se invirtieron.

Es interesante analizar esta sección porque se comporta de manera muy diferente al resto, para comenzar no hay registros de elementos cubiertos por aire en esta sección, en segundo lugar la velocidad relativa entre la pared del barco y el agua varía entre 0,02 y 0,4 [m/s], a diferencia de los otros modelos que si se ven afectados directamente por el movimiento del agua. Finalmente la reducción se debe principalmente al comportamiento de la capa límite, que debido al efecto Magnus logrado en las secciones anteriores, en esta sección se reduce el tamaño del desprendimiento de la capa límite.

Se puede observar que en la sección trasera, el modelo SIA mantiene un comportamiento creciente exponencialmente, tal como se comportan las otras secciones, sin embargo el modelo CIA tiene una tendencia a mantenerse constante y a potencias entre 0 y 15 [W].

4.5.4 Resultado Neto

A continuación se resume los resultados obtenidos por la suma neta de todas las secciones.

Tabla 26: Resumen de resultados (Valor de $C_d=0,76$ y $K_{TUR}=1,69$)

Velocidad [m/s]	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
$W_{CAL1}[W]$	981	1755	2840	4281	6124	8410	11184	14485	18354	22832
$W_{CAL2}[W]$	492	918	1537	2387	3502	4920	6677	8809	11353	14344
$W_{SIA}[W]$	520	992	1723	2698	4226	6011	8206	10881	14066	17798
$W_{CIA}[W]$	502	889	1570	2288	3067	4496	6565	7876	10091	11950
% Cubierto por aire	33,1	39,9	35,5	45,2	50,4	41,9	46,0	43,1	44,4	41,1
$C_{dSIA}(2)$	0,72	0,76	0,79	0,80	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87	0,88
$C_{dCIA}(2)$	0,74	0,68	0,72	0,68	0,62	0,64	0,69	0,63	0,63	0,59
Reducción lograda [%]	-3,6	10,5	8,9	15,2	27,4	25,2	20,0	27,6	28,3	33,2

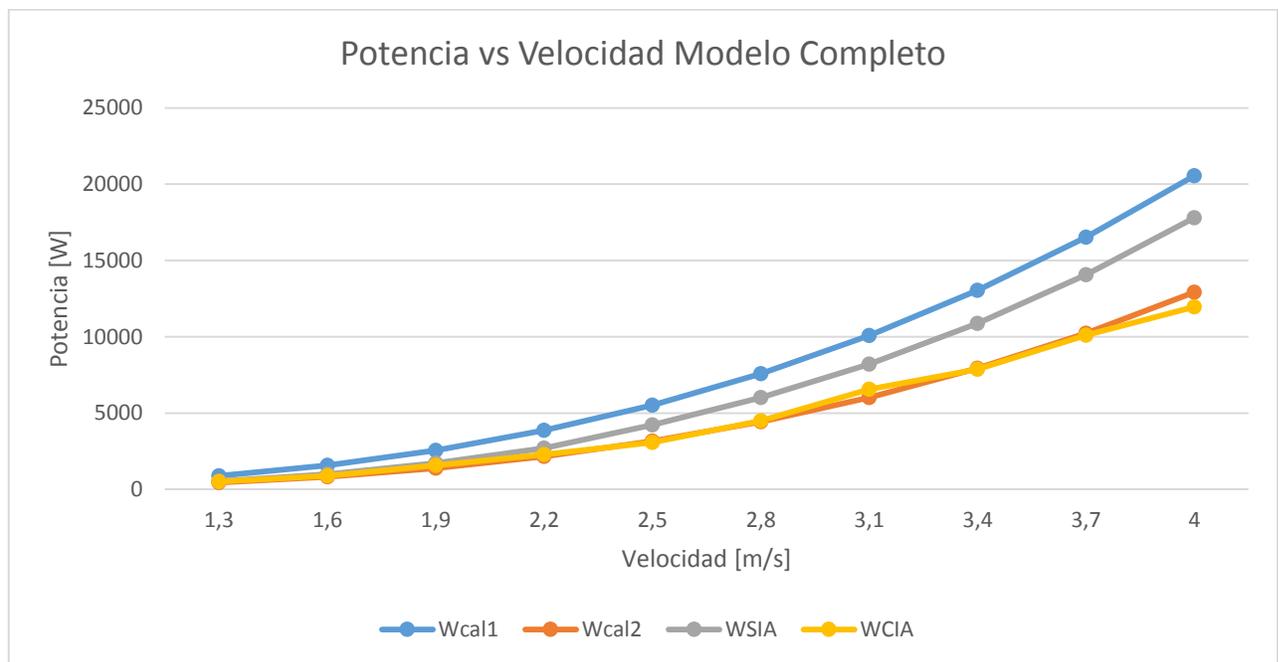


Gráfico 4: Potencia vs Velocidad Modelo Completo SIA

Todos los modelos se encuentran dentro de las aproximaciones, y se observa la misma tendencia de crecimiento. Se mantiene bastante cerca del margen reducción esperada, e incluso se obtuvo una mayor reducción en el caso del modelo de mayor velocidad. Se observa una tendencia a aumentar la reducción cuando se aumenta la velocidad del modelo, esto se debe a que la inyección de aire permitió conservar el porcentaje de zonas cubiertas por aire entre 40 y 45%, puesto que a mayores velocidades se concentran mayores esfuerzos, mantener cubierto el mismo porcentaje anula una mayor cantidad de esfuerzos alrededor del barco.

5 CONCLUSIONES

Comportamiento Capa Límite

Existe una reducción del tamaño de la capa límite provocado por el efecto Magnus generado gracias a las burbujas alrededor del modelo. Este efecto trae consigo un aumento parcial en los esfuerzos no cubiertos por lubricación de aire, sin embargo se compensa con la disminución tendiente a 0 de los esfuerzos concentrados en las zonas cubiertas por burbujas. También se aprecia una disminución del grosor de capa límite lateral y reducción del largo de la estela trasera, lo que indica que la inyección de burbujas permite aumentar las características hidrodinámicas del modelo.

En cuanto al análisis dinámico del modelo

Se observó que la sección trasera es la que menor influencia tiene en la carga neta, sin embargo también se vio afectada por la inyección de aire obteniéndose una reducción promedio de 82% entre los modelos. Esto se explica que el efecto Magnus formado en las otras secciones, permiten que el desprendimiento de capa límite se reduzca en esta zona, reduciendo así el arrastre.

Para la sección lateral, se observa una reducción creciente a medida que aumenta la velocidad de movimiento del modelo. Esta sección predomina por sobre el resto en cuanto a la magnitud, esto se debe principalmente al aumento de velocidad que se da de forma natural en la capa límite cuando un fluido atraviesa un cuerpo sólido. En esta sección se reduce en un 39% la potencia requerida para navegar (promediando los resultados entre las distintas velocidades).

Finalmente para la sección frontal no se observa una clara tendencia a la reducción de arrastre, es más, en algunos modelos aumenta la carga ejercida sobre la pared del barco, lo que indica que este fenómeno no siempre es beneficioso, o bien es beneficioso bajo ciertas circunstancias. En este caso, solo se logró una reducción en los modelos que presentaron un porcentaje de lubricación mayor al 60%, por lo que en futuras investigaciones habría que trabajar sobre ese porcentaje de lubricación en esta sección para obtener resultados favorables. Pese a los números negativos, el promedio de reducción de potencia alcanzado fue de 5%.

Del modelo completo se alcanza un promedio de reducción de un 19,3% en la potencia requerida para navegar a la velocidad constante, y se observa una tendencia que a más altas velocidades, mayor será la reducción. Se recomienda estudiar hasta qué punto la reducción sigue aumentando extendiendo el espectro de velocidades en futuras investigaciones.

La etapa de validación de modelos fue exitosa

Se logra comprobar que los modelos operan en estado estacionario y se obtienen resultados dentro del margen esperado. Además se observa la misma tendencia de crecimiento entre los resultados y los modelos teóricos, por lo que el comportamiento del modelo fue tal como se esperaba según indica la bibliografía. Con respecto a la elección de mallado y tamaño de volumen de control, se puede concluir que se tiene un margen de error de $\pm 3,9\%$ en los resultados, puesto que fue el error más grande encontrado en esta etapa.

Conclusiones generales

La presencia de inyección de aire continua si logra una reducción en las fuerzas de arrastre. Siendo la sección lateral la más afectada por el efecto, seguida por la sección trasera, que si bien presenta mayor porcentaje de reducción, esta es menos representativa del valor neto, pues posee la magnitud es menor de las fuerzas actuantes en la sección traseras son considerablemente menores.

No se logra apreciar relación directa entre el porcentaje de elementos cubiertos por aire y el porcentaje de reducción de la potencia requerida para navegar. Se observa que en la sección lateral, cuyo promedio de elementos cubierto de aire fue de 39% se obtuvo una reducción promedio del 25% a diferencia de la sección frontal que el promedio de reducción fue de apenas un 5%, sección que además presenta un promedio de elementos cubiertos por aire de 62%.

La aproximación realizada a partir de estudios en pingüinos permite estimar la potencia alcanzada en pequeñas embarcaciones, pues el comportamiento de la reducción es similar en todos los modelos (exceptuando la sección trasera, puesto que el efecto de inyección de aire afecta de manera diferente en esta sección).

Trabajo futuro

Esta investigación puede ser continuada de varias formas. Una de ellas es ampliar el espectro de muestra, ya sea cambiando la velocidad de movimiento del barco o bien variar la relación entre la inyección de aire y la velocidad del barco.

La segunda manera propuesta para continuar la investigación es aumentar el número de inyectoras en otras secciones del barco con el fin lograr una mejor lubricación con aire.

Además, se recomienda hacer un estudio sobre el costo energético que requiere la inyección de aire en función de la velocidad de inyección, para determinar hasta qué punto este mecanismo es realmente conveniente.

Finalmente están las opciones que involucran cambiar el modelo de trabajo, ya sea con un nuevo modelo de simulación o bien construir un prototipo y realizar pruebas experimentales.

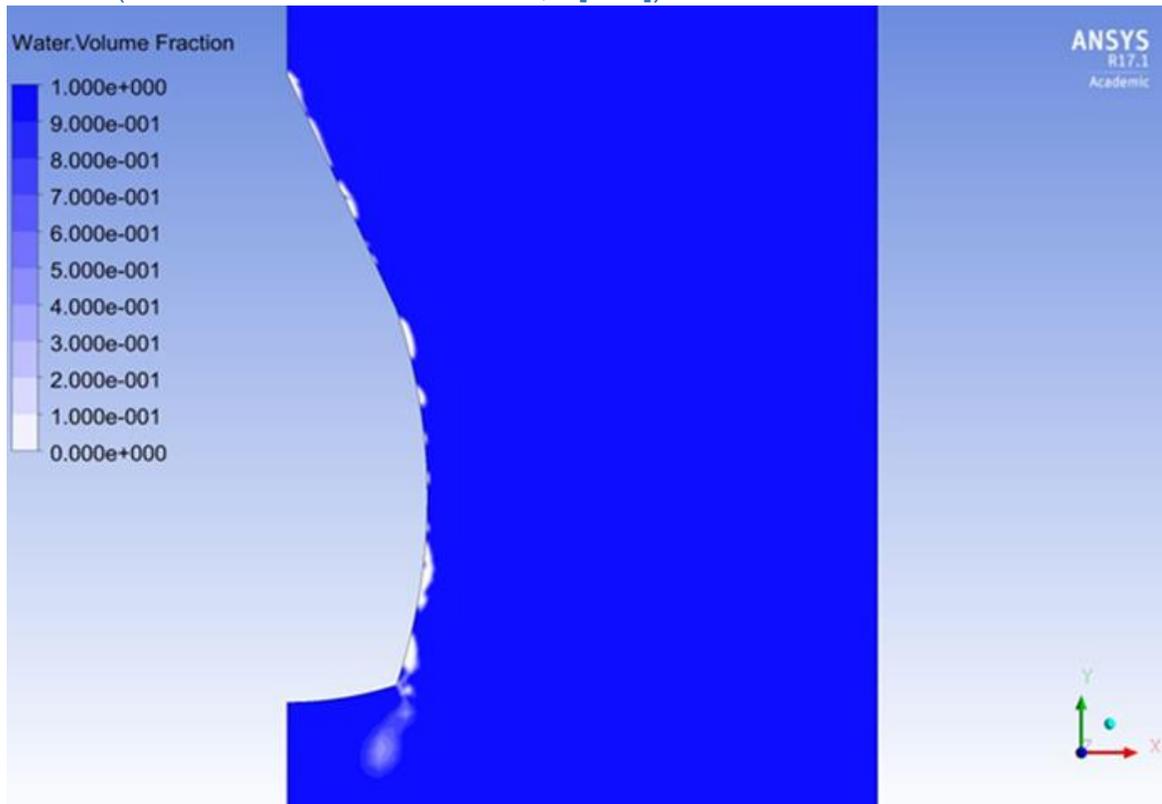
6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alvarado Yunuary, A. G. (6 de Abril de 2008). *Flujo en Canales Abiertos*. (Mecanica de Fluidos, UNEFA) Obtenido de <http://mecanicafluidos7mo.blogspot.cl/2008/04/flujo-en-canales-abiertos.html>
- [2] Aula Náutica. (s.f.). *Nomenclatura Náutica*. (Escola Port Barcelona) Obtenido de <http://aulanautica.org/unidad/pnb-per-nomenclatura-nautica/>
- [3] Chakraborty, S. (07 de Octubre de 2017). *How To Estimate The Power Requirement Of A Ship*. Recuperado el 07 de Octubre de 2017, de <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/power-requirement-ship-estimated/>
- [4] Distribuidor, M. (10 de Agosto de 2007). *Mercado Libre*. (Marauto Distribuidor) Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-829466842-projeto-de-barco-pesca-madeira-4-modelos-barco-frete-gratis-_JM
- [5] Garg, V. K. (1998). *Applied Computational Fluid Dynamics*. Columbus: Marcel Dekker.
- [6] Grupo 51. (11 de Noviembre de 2009). *Fuerzas sobre el barco II: Fuerza de roce*. (Proyecto Mecanica de Fluidos 2009-2) Obtenido de <http://ich1102-2do2009g51.blogspot.cl/2009/11/fuerzas-sobre-el-barco-ii-fuerza-de.html>
- [7] Guerrero, A. J. (2016). *Sistemas de reducción de la resistencia al avance en la navegación mediante una capa de aire entre el casco y el agua*. Barcelona: Facultad de Náutica de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.
- [8] Hoerner, S. F. (1965). *Fluid-Dynamic Drag*. Washington D.C.: Hoerner Fluid Dynamics. Obtenido de <https://docs.google.com/file/d/0Bx0MqOfev7dnTnB0eFRIN2JQb0k/edit?pli=1>
- [9] Jhon Davenport, Roger N. Hughes, Marc Shorten, Poul S. Larsen. (2011). Drag reduction by air release promotes fast ascent. In *Evolution and ecology of marine biodiversity* (pp. 171-182). Lyngby, Denmark: MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES.
- [10] Kantharia, R. (2013). *A Resource Guide To Marine Engineering*. Bangalore: Marine Insight.
- [11] Kantharia, R. (2014). *A Guide to Emission Control Areas (ECA) Compliance For Ships*". Bangalore: Marine Insight.
- [12] Marc Perlin, S. C. (2015). *Methods to Reduce Hydrodynamic Resistance*. Singapore: World Scientific.
- [13] Morrison, F. A. (2016). *Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere*. Michigan Technological University. Houghton: Michigan Technological University, Department of Chemical Engineering. Obtenido de <http://pages.mtu.edu/~fmorriso/DataCorrelationForSphereDrag2016.pdf>
- [14] Murdock, J. W. (1993). *Fundamental Fluid Mechanics for the Practicing Engineer*. New York: Marcel Dekker.
- [15] National Geographic. (04 de Octubre de 2014). *Emperor Penguin: Plumage releases air to propel body out of water*. Recuperado el 04 de Septiembre de 2018, de <https://asknature.org/strategy/plumage-releases-air-to-propel-body-out-of-water/#.WpsiRmrOXIU>

- [16] Nautic Advisor. (11 de Julio de 2002). *Nautic Advisor*. (Nautic Advisor) Recuperado el 20 de Diciembre de 2018, de <https://www.nauticadvisor.com/blog/2016/04/12/toda-la-informacion-sobre-pintura-para-barcos/>
- [17] Shabir Grover, B. V. (2017). *Analysis on Drag Reduction of Bluff Body using Dimples*. Dehli: International Journal of Advanced Production and Industrial Engineering.
- [18] Sinha, T. (09 de Mayo de 2017). *Various Methods Used for Evaluating Ship's Resistance*. Recuperado el 09 de Mayo de 2017, de <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/various-methods-for-ship-resistance-evaluation/>
- [19] Universidad Tecnica Lisboa. (s.f.). *Resistance of a Ship*. (Fenix) Obtenido de https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577315265/RP_Lecture6and7.pdf

7 ANEXOS

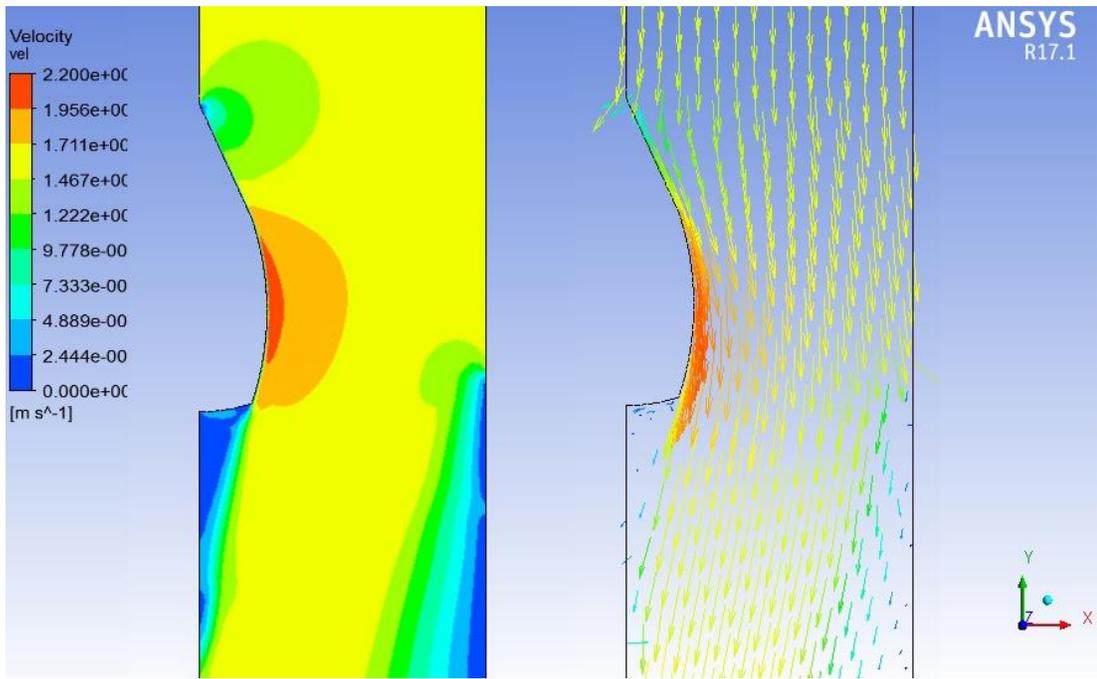
Modelo 2 (Velocidad de movimiento 1,6 [m/s])



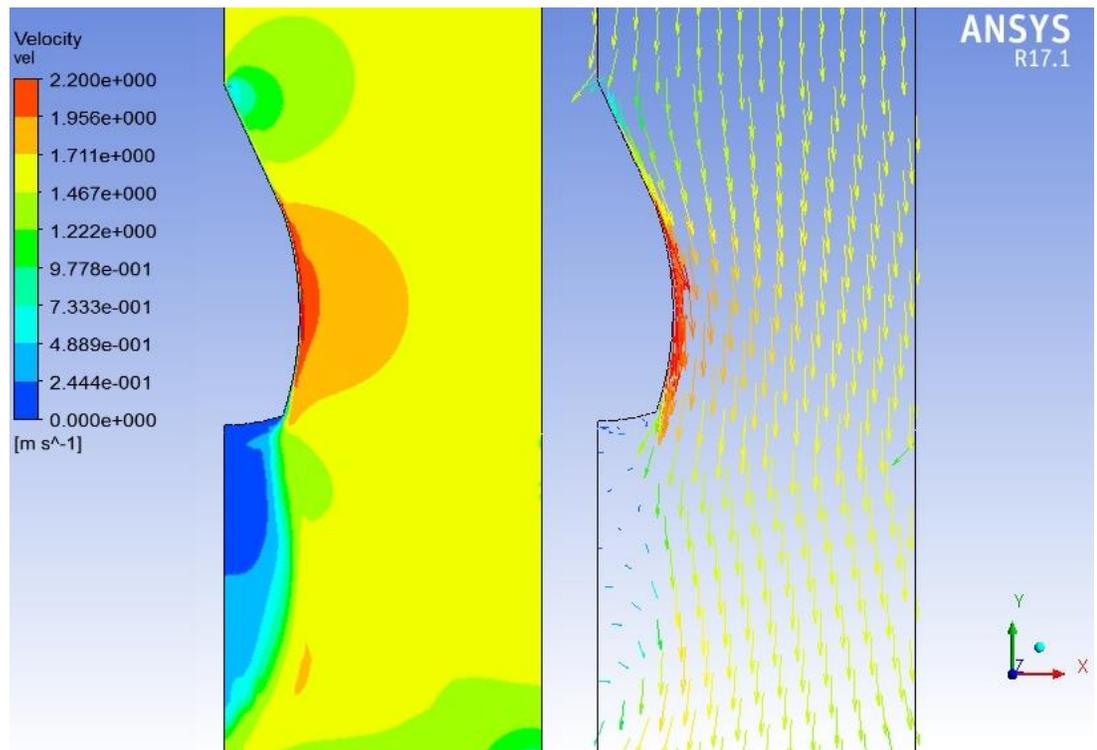
Anexo 1: Diagrama de fase modelo 2.

Anexo 2: Tabla de reportes de fase modelo 2.

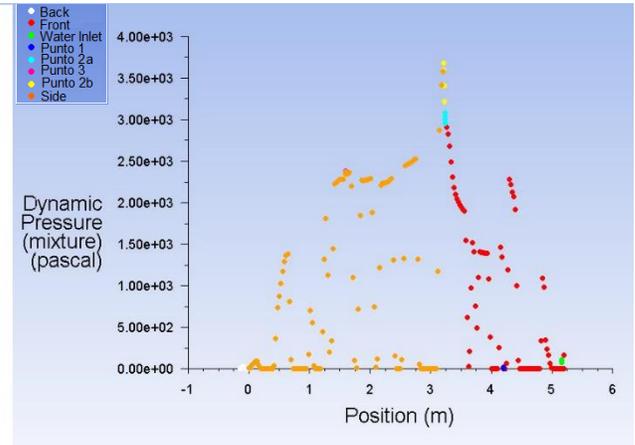
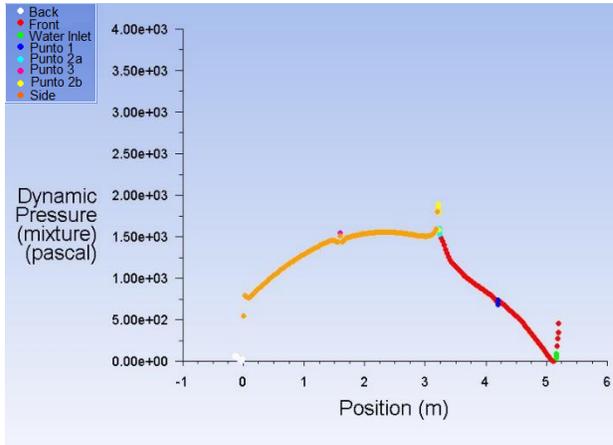
Sección	N° de elementos cubiertos por aire	N° total de elementos	% de área cubierta por aire
<i>Frontal</i>	57	100	57,0
<i>Lateral</i>	42	118	35,6
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	99	250	39,6



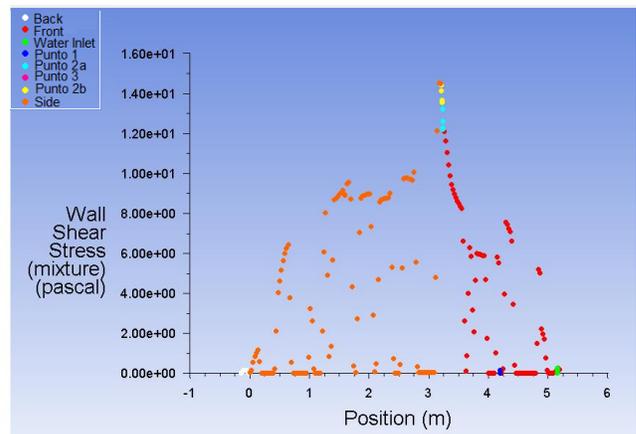
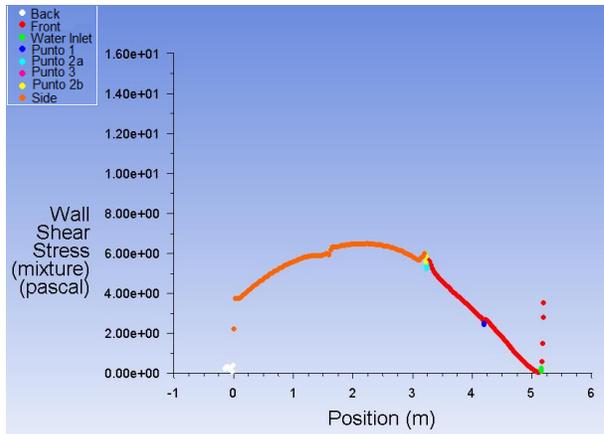
Anexo 3: Capa limite modelo 2 SIA



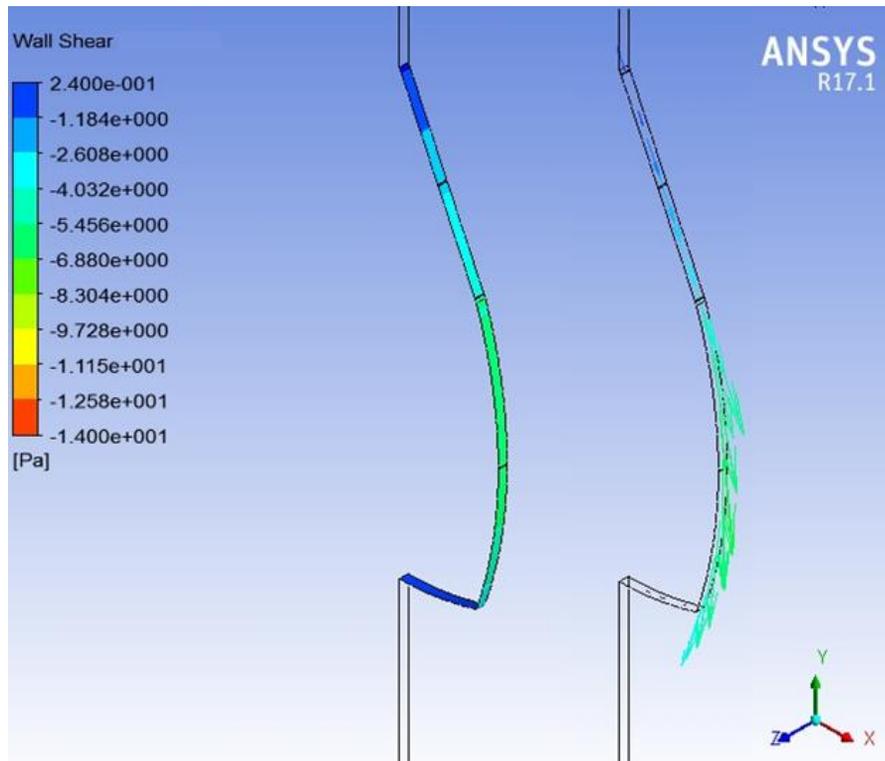
Anexo 4: Capa Limite modelo 2 CIA



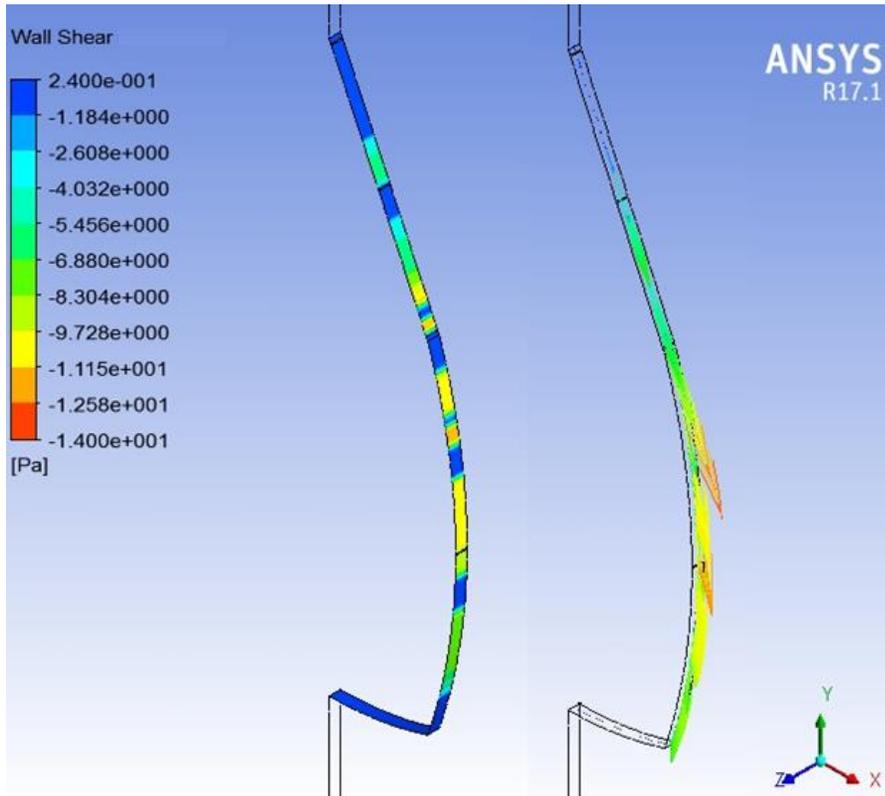
Anexo 5: Grafico de Presión Dinámica modelo 2 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha)



Anexo 6: Grafico de Esfuerzos de Corte modelo 2 SIA(a la izquierda) y CIA (a la derecha)

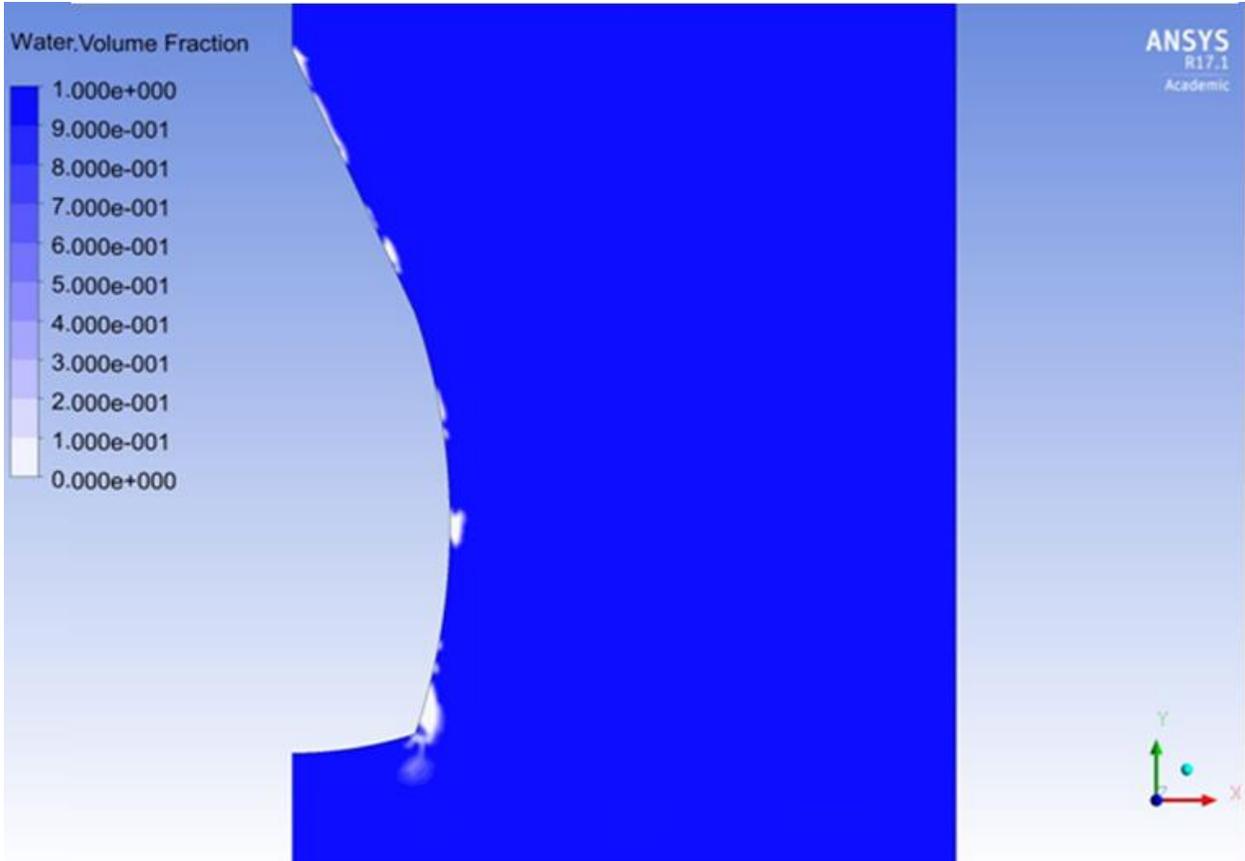


Anexo 7: Concentración de Esfuerzos modelo 2 SIA



Anexo 8: Concentración de Esfuerzos modelo 2 CIA

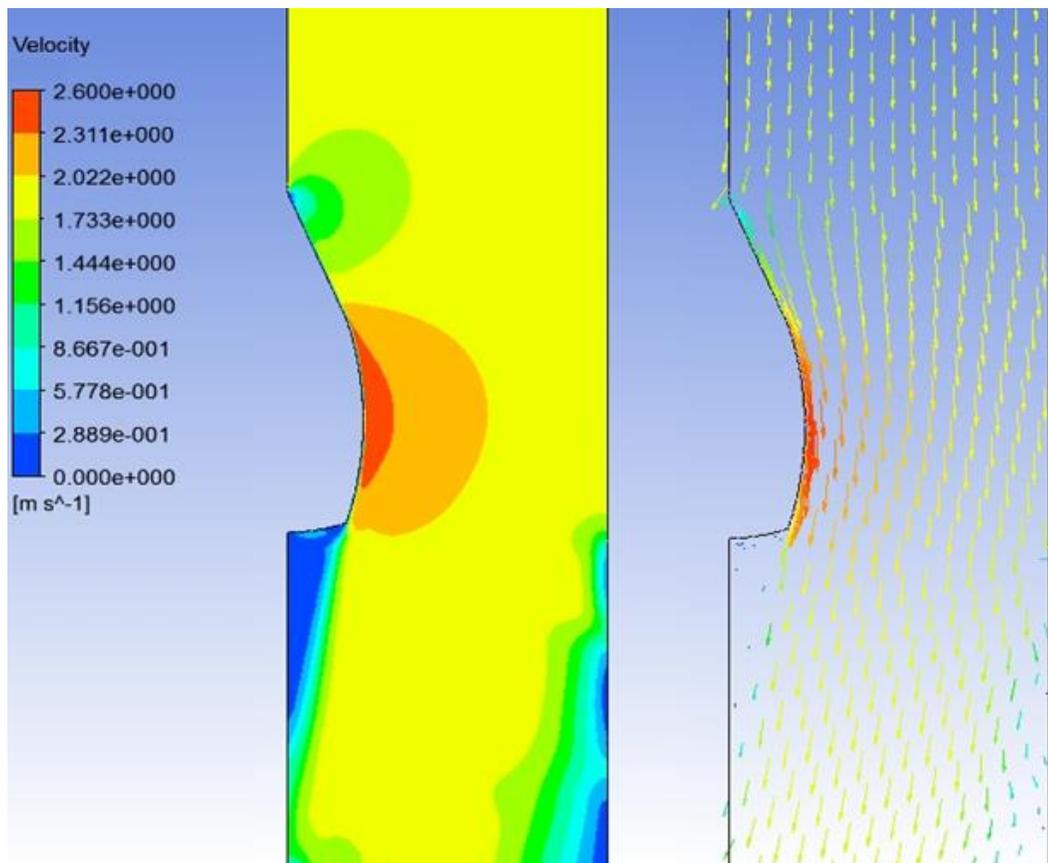
Modelo 3 (Velocidad de movimiento 1,9 [m/s])



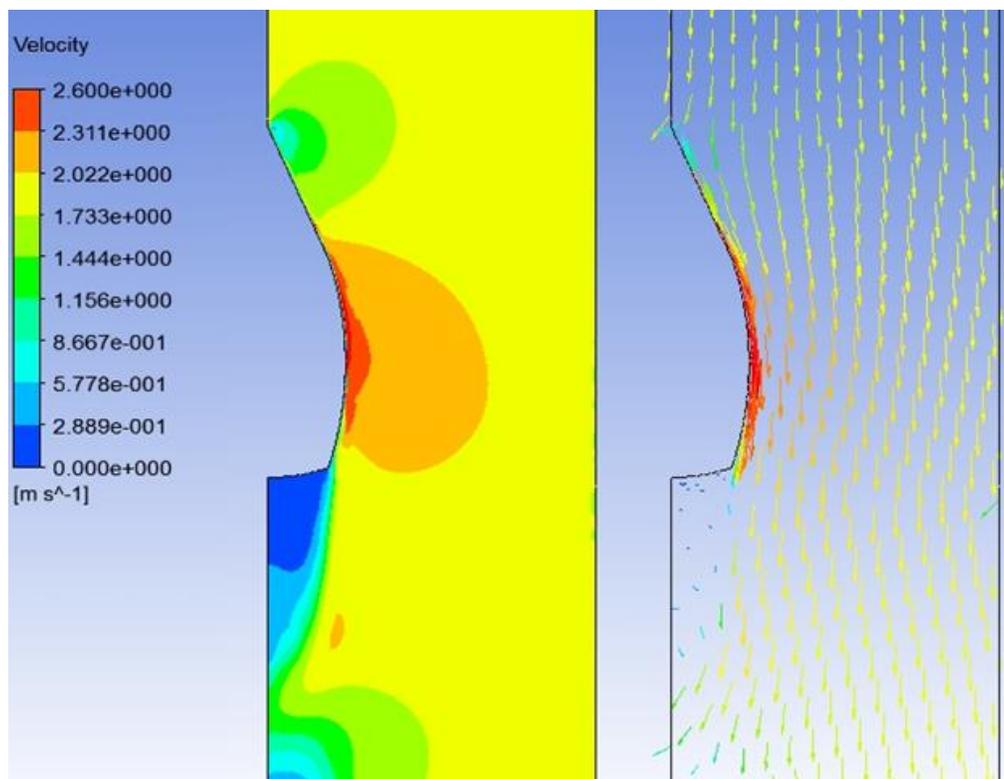
Anexo 9: Diagrama de Fases modelo 3.

Anexo 10: Tabla de elementos modelo 3.

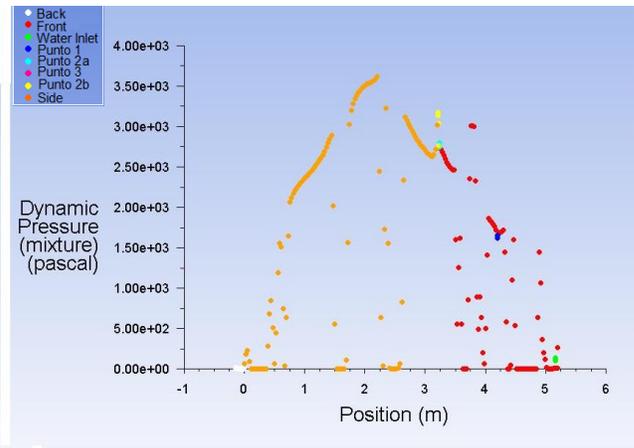
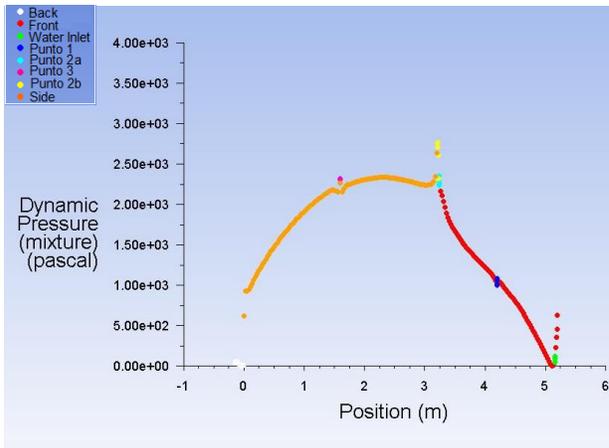
Sección	N° de elementos cubiertos por aire	N° total de elementos	% de área cubierta por aire
<i>Frontal</i>	84	100	84,0
<i>Lateral</i>	39	118	33,1
<i>Trasera</i>	0	32	0
<i>Total</i>	123	250	49,2



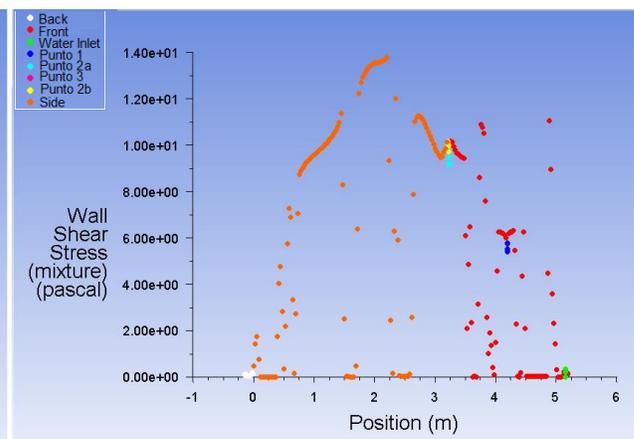
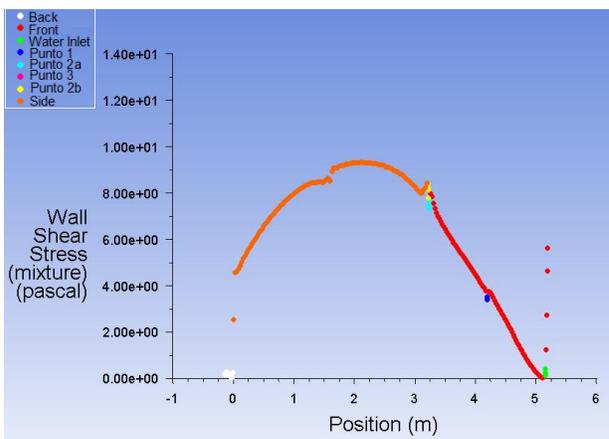
Anexo 11: Capa Limite modelo 3 SIA



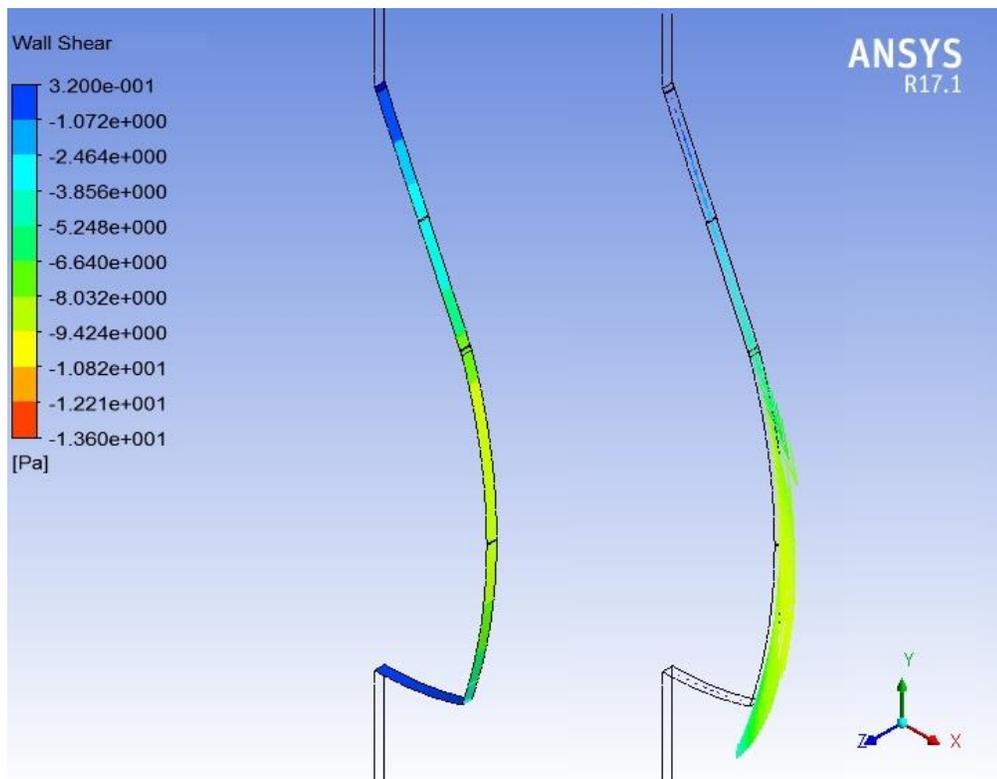
Anexo 12: Capa Limite modelo 3 CIA



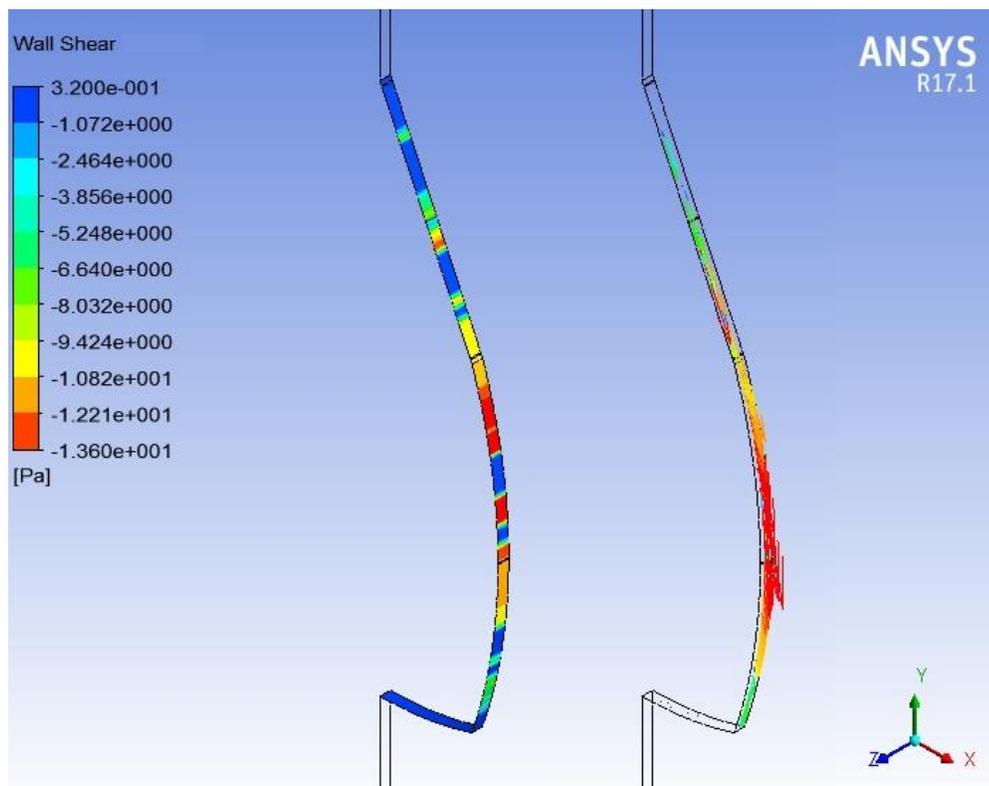
Anexo 13: Grafico de Presión Dinámica modelo 3 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha).



Anexo 14: Grafico de Esfuerzos de Corte modelo 3 SIA(a la izquierda) y CIA (a la derecha).

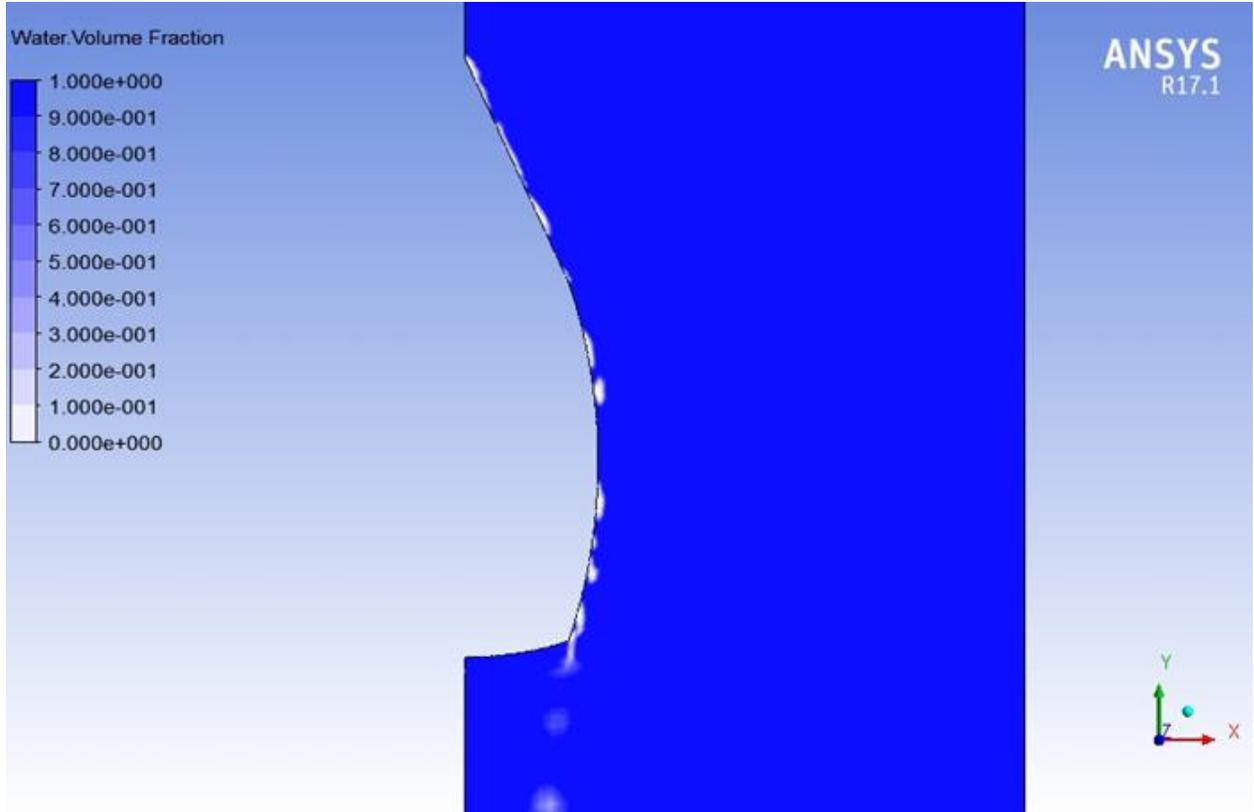


Anexo 15: Concentración de Esfuerzos modelo 3 SIA



Anexo 16: Concentración de Esfuerzos modelo 3 CIA

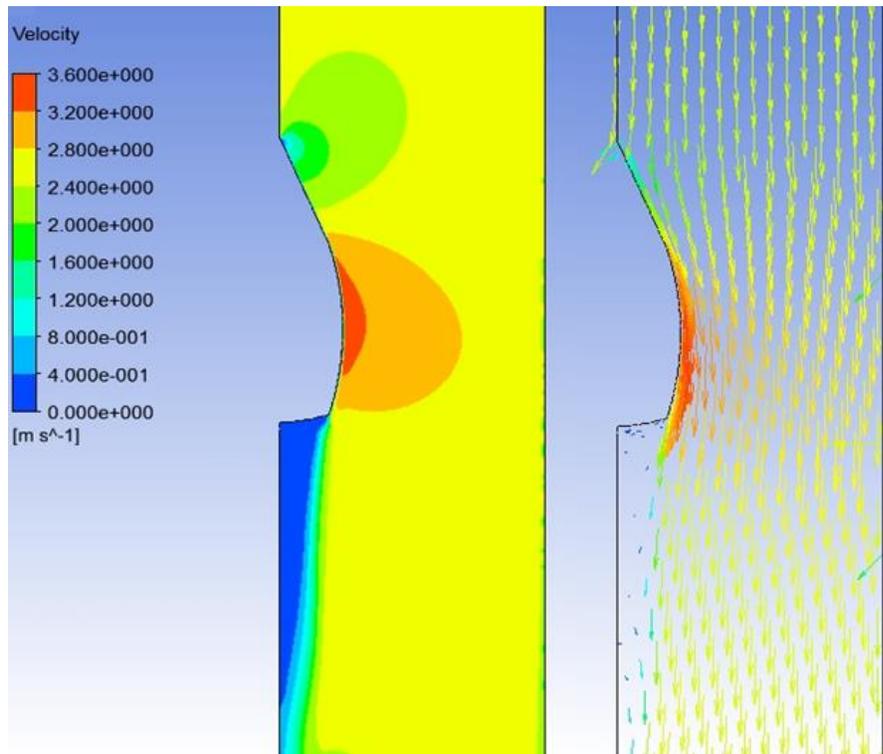
Modelo 5 (Velocidad de movimiento 2,5 [m/s])



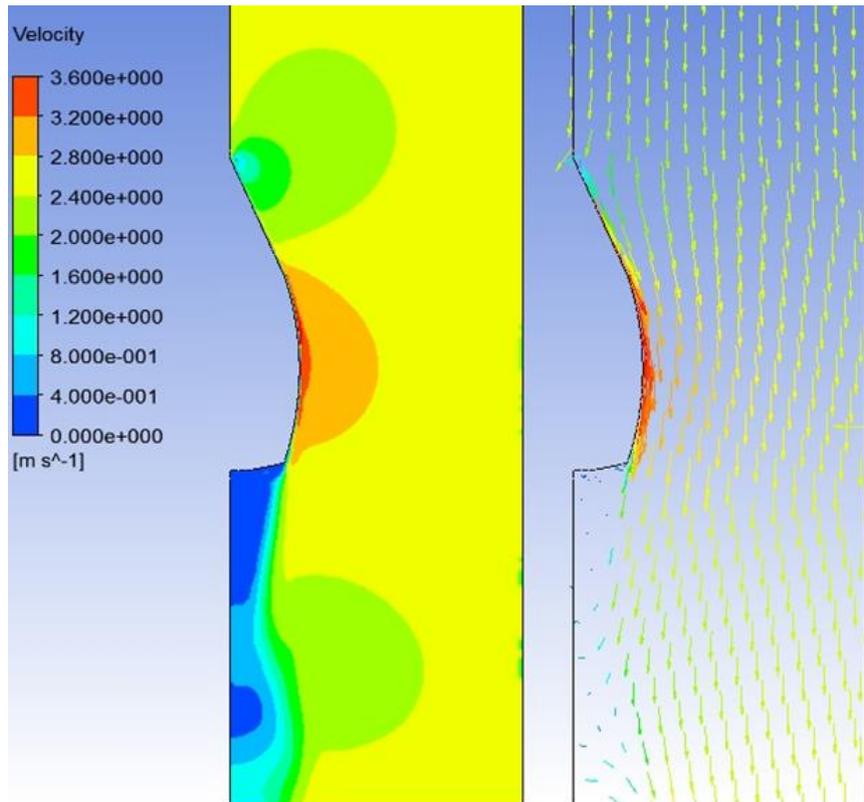
Anexo 17: Diagrama de Fases modelo 5

Anexo 18: Tabla de reportes de fase modelo 5.

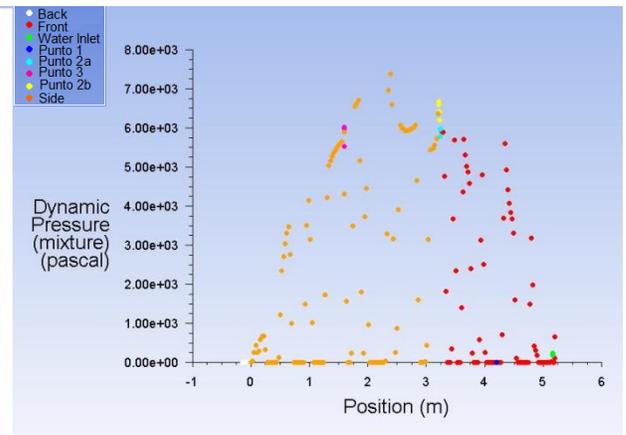
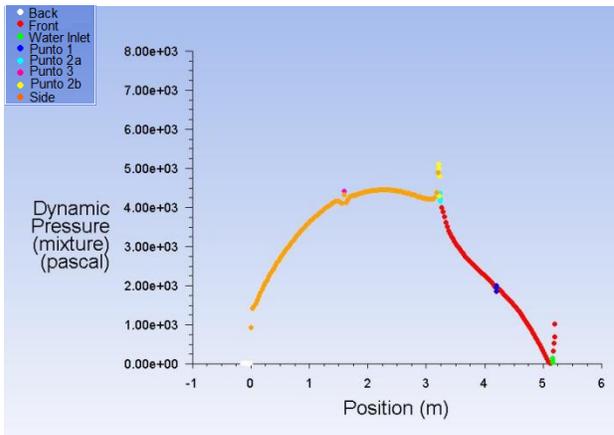
Sección	N de elementos cubiertos por aire	N total de elementos	% de elementos cubiertos por aire
<i>Delantera</i>	68	100	68,0
<i>Lateral</i>	57	118	48,3
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	125	250	50,0



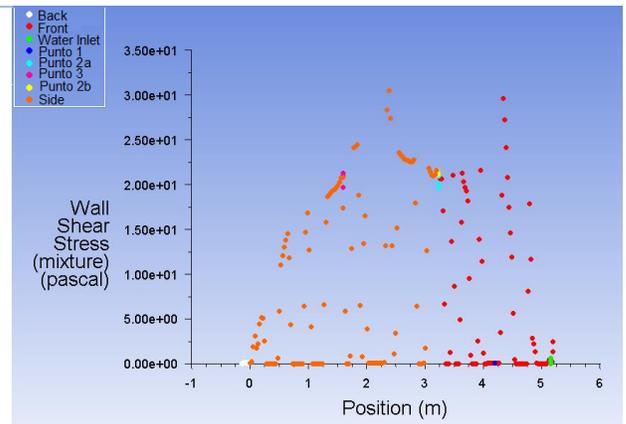
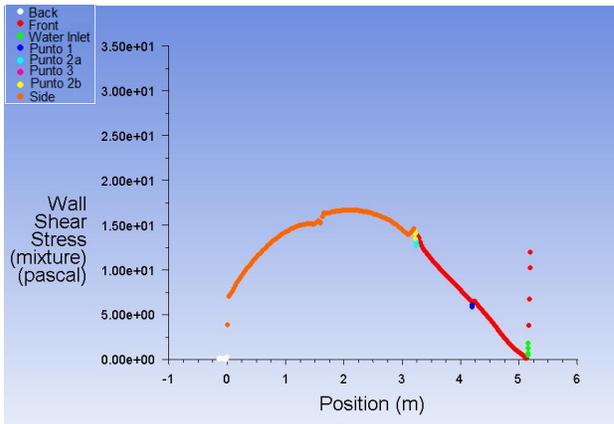
Anexo 19: Capa Limite modelo 5 SIA



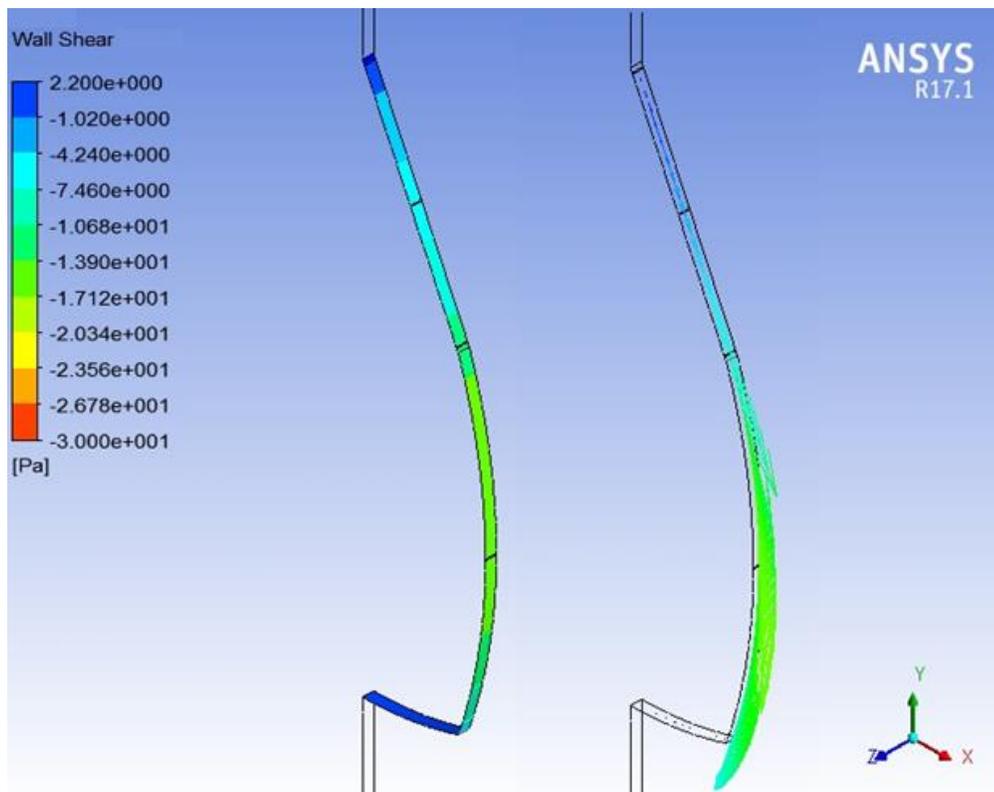
Anexo 20: Capa Limite modelo 5 CIA



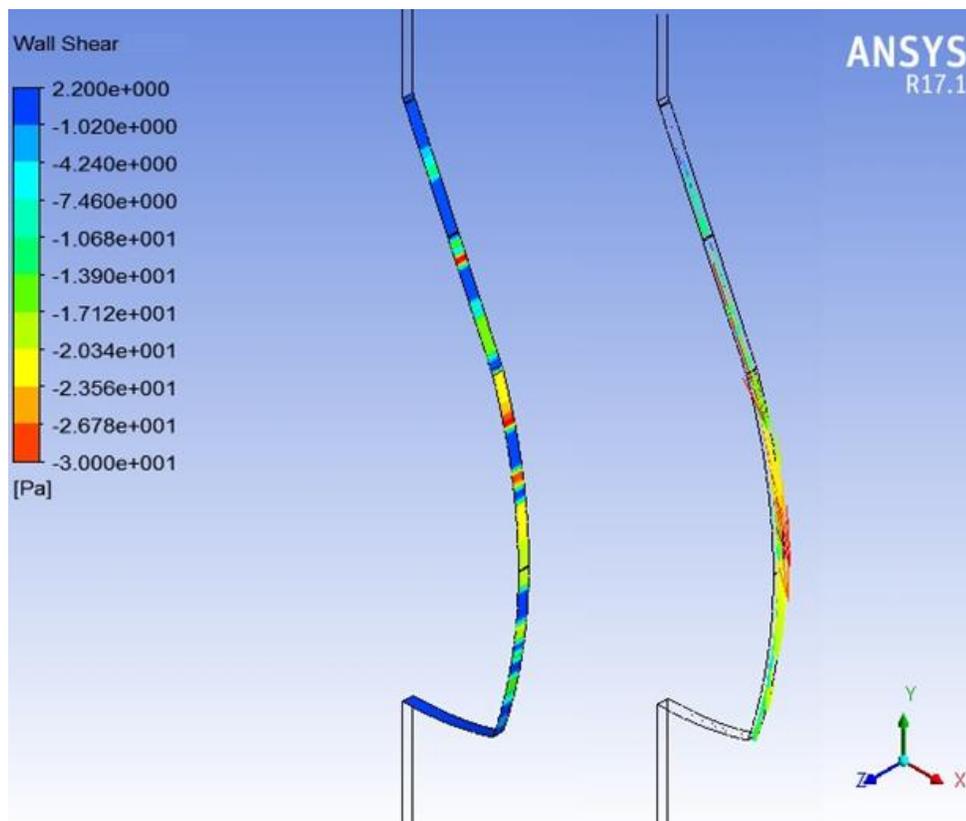
Anexo 21: Gráfico de Presión Dinámica modelo 5 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha).



Anexo 22: Gráfico de Esfuerzos de Corte modelo 5 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha).

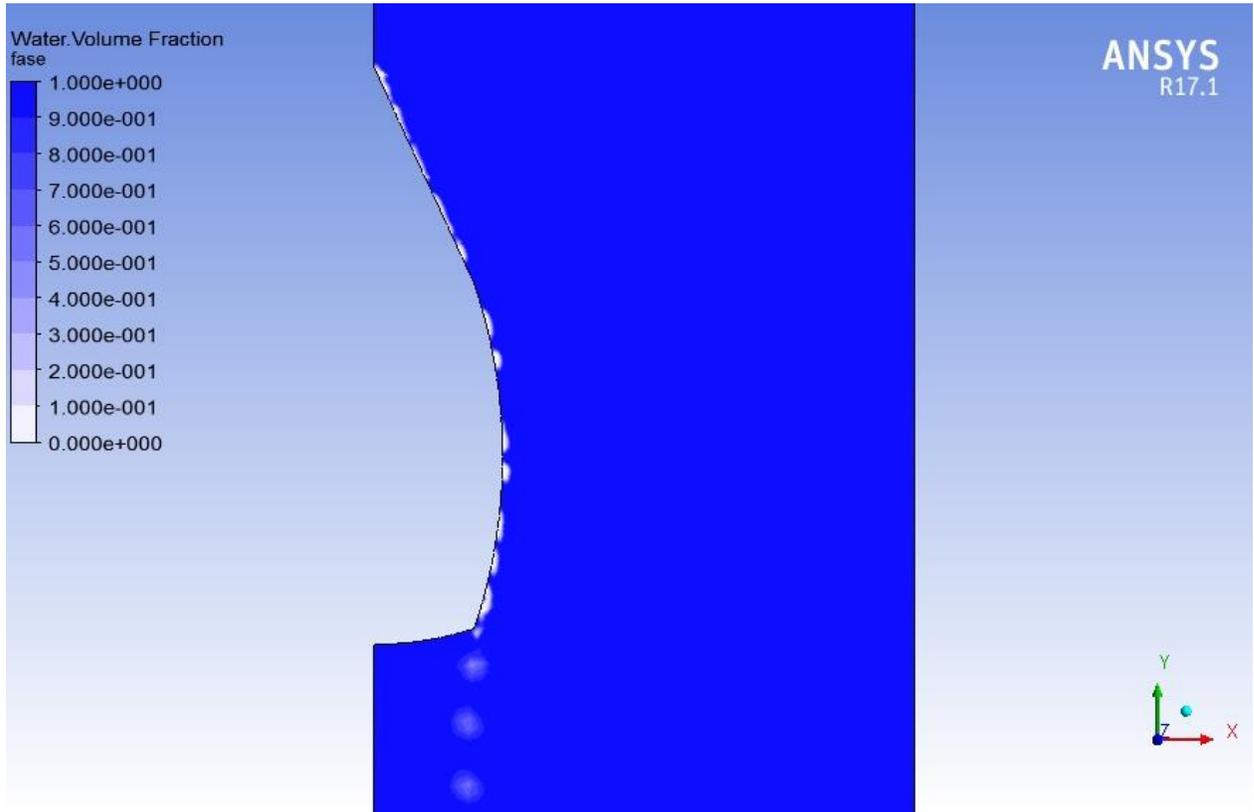


Anexo 23: Concentración de Esfuerzos modelo 5 SIA



Anexo 24: Concentración de Esfuerzos modelo 5 CIA

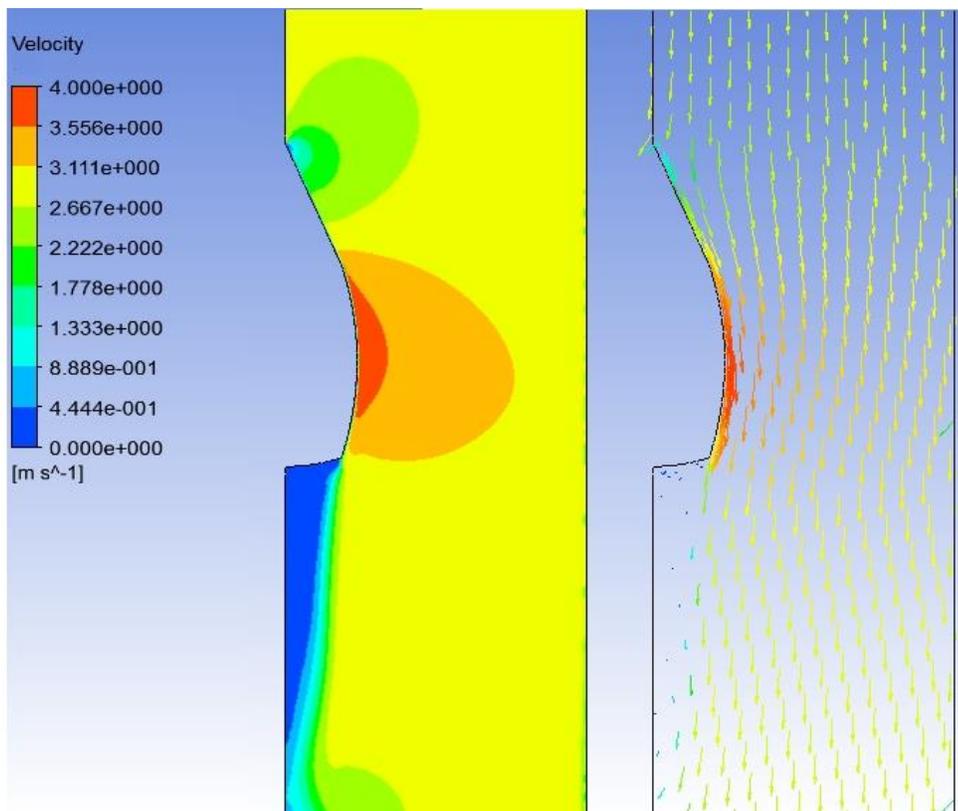
Modelo 6 (Velocidad de movimiento 2,8 [m/s])



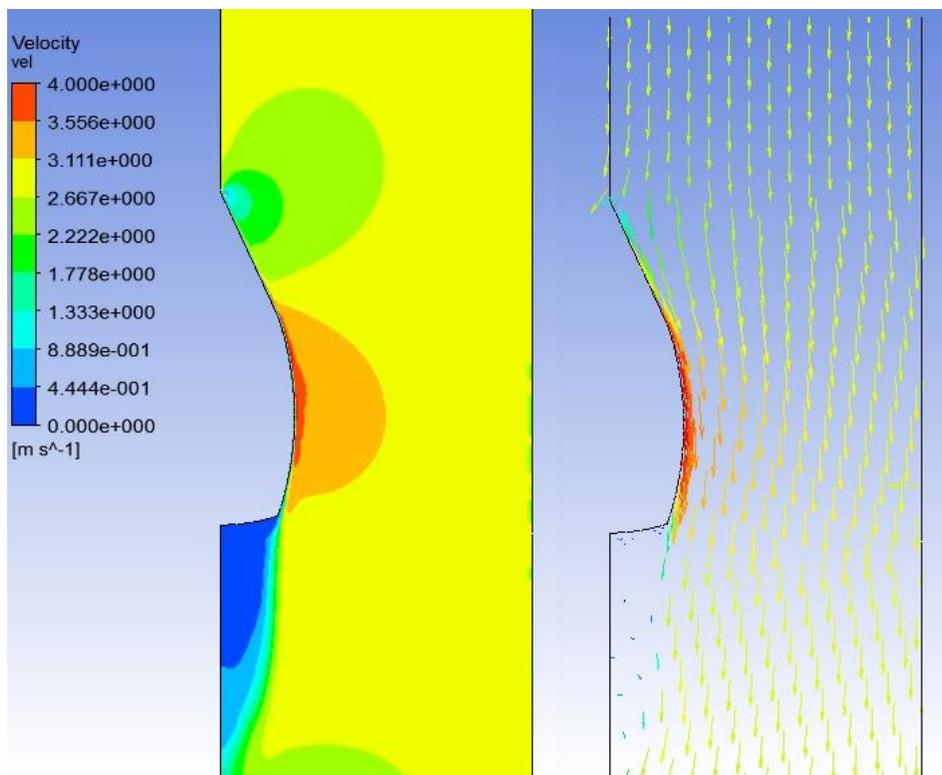
Anexo 25: Diagrama de Fases modelo 6.

Anexo 26: Tabla de reportes de fase modelo 6.

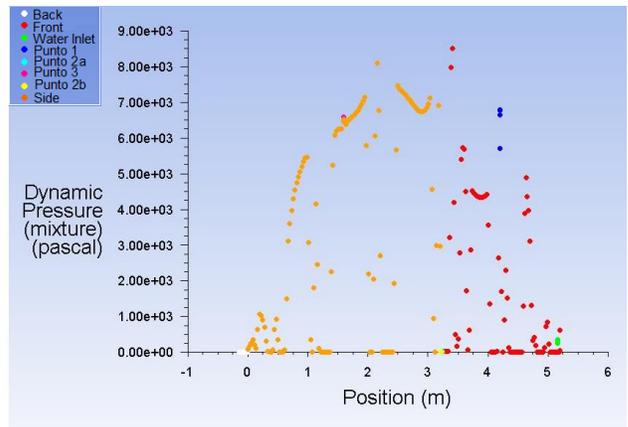
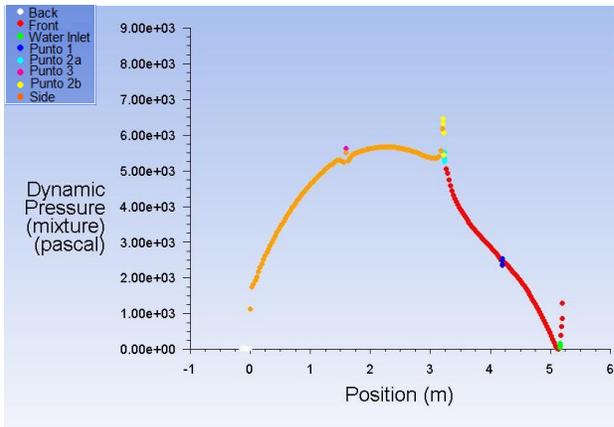
Sección	N de elementos cubiertos por aire	N total de elementos	% de elementos cubiertos por aire
<i>Delantera</i>	69	100	69,0
<i>Lateral</i>	35	118	29,7
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
Total	104	250	41,6



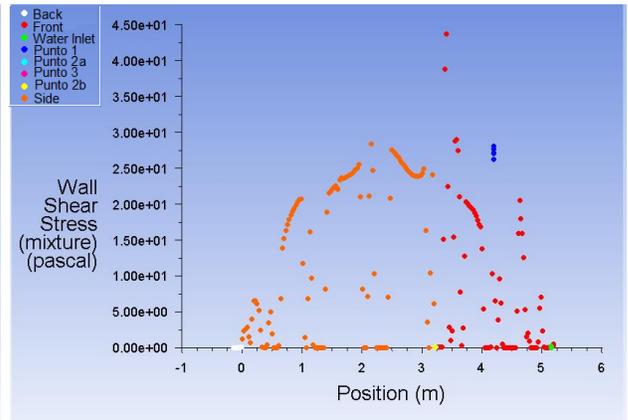
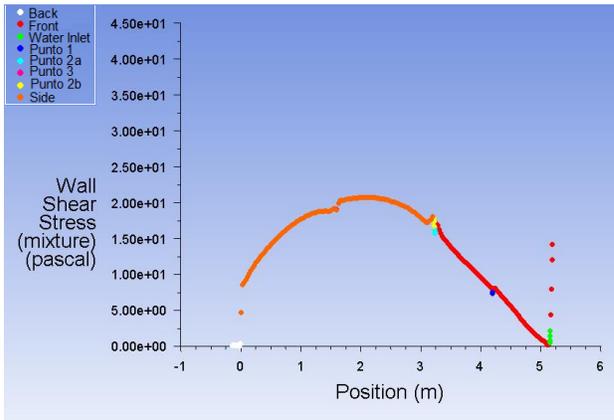
Anexo 27: Capa Limite modelo 6 SIA



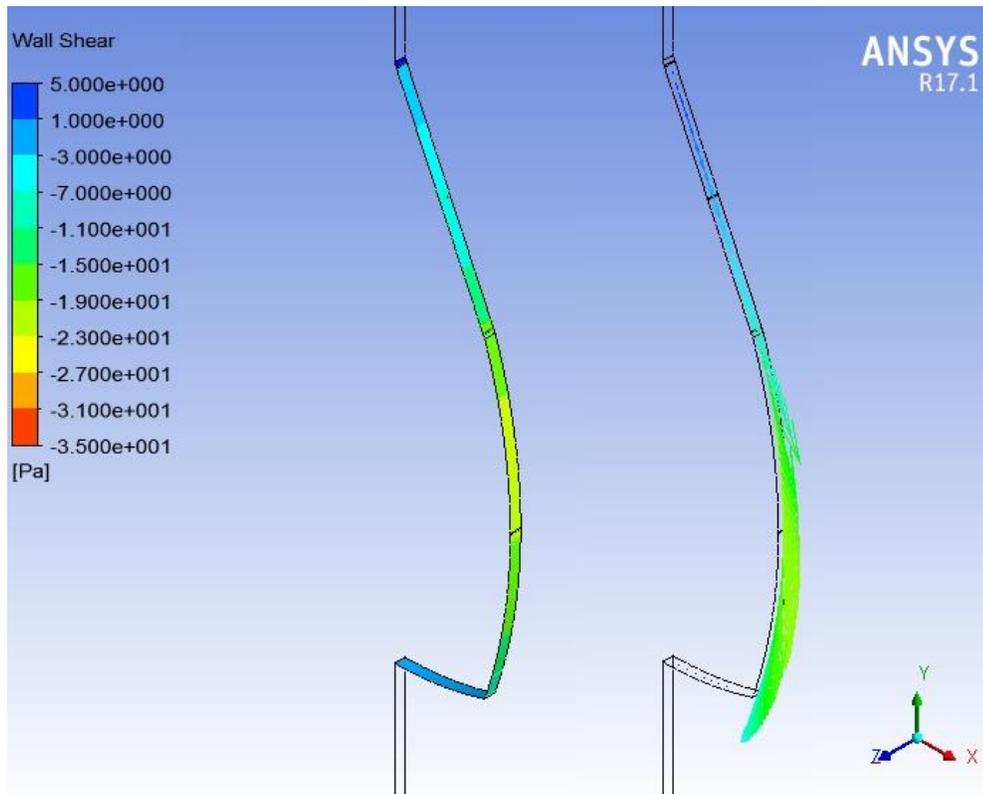
Anexo 28: Capa Limite modelo 6 CIA



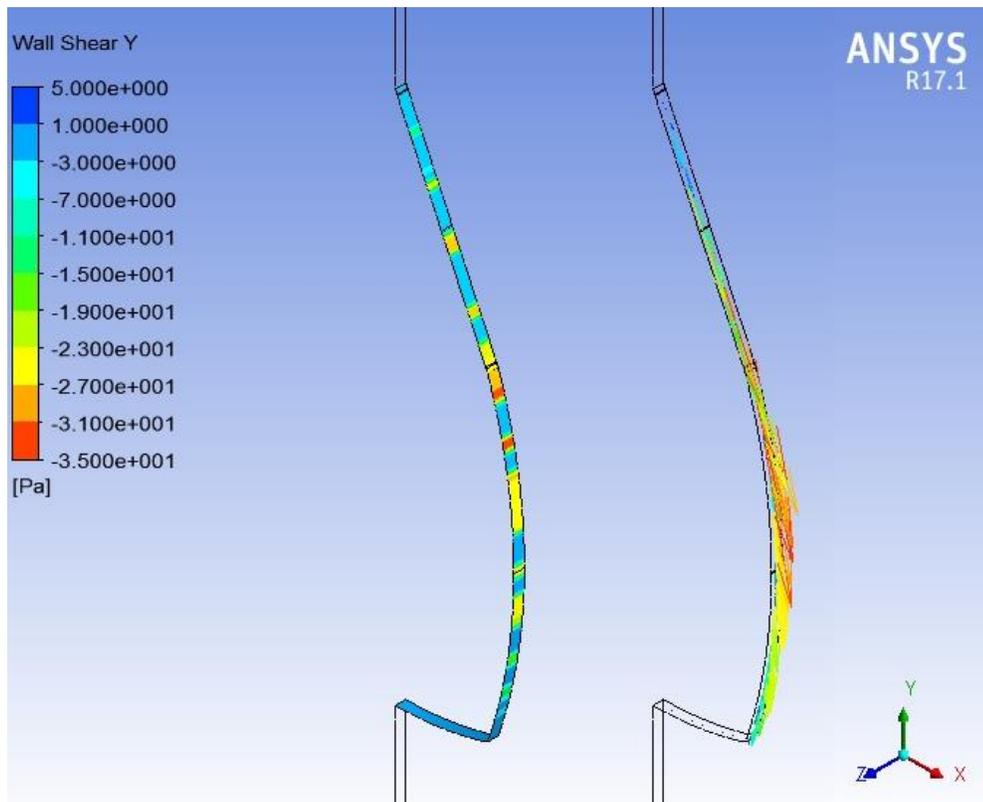
Anexo 29: Grafico de Presión Dinámica modelo 6 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha)



Anexo 30: Grafico de Esfuerzos de Corte modelo 6 SIA (a la izquierda) y CIA (a la izquierda)

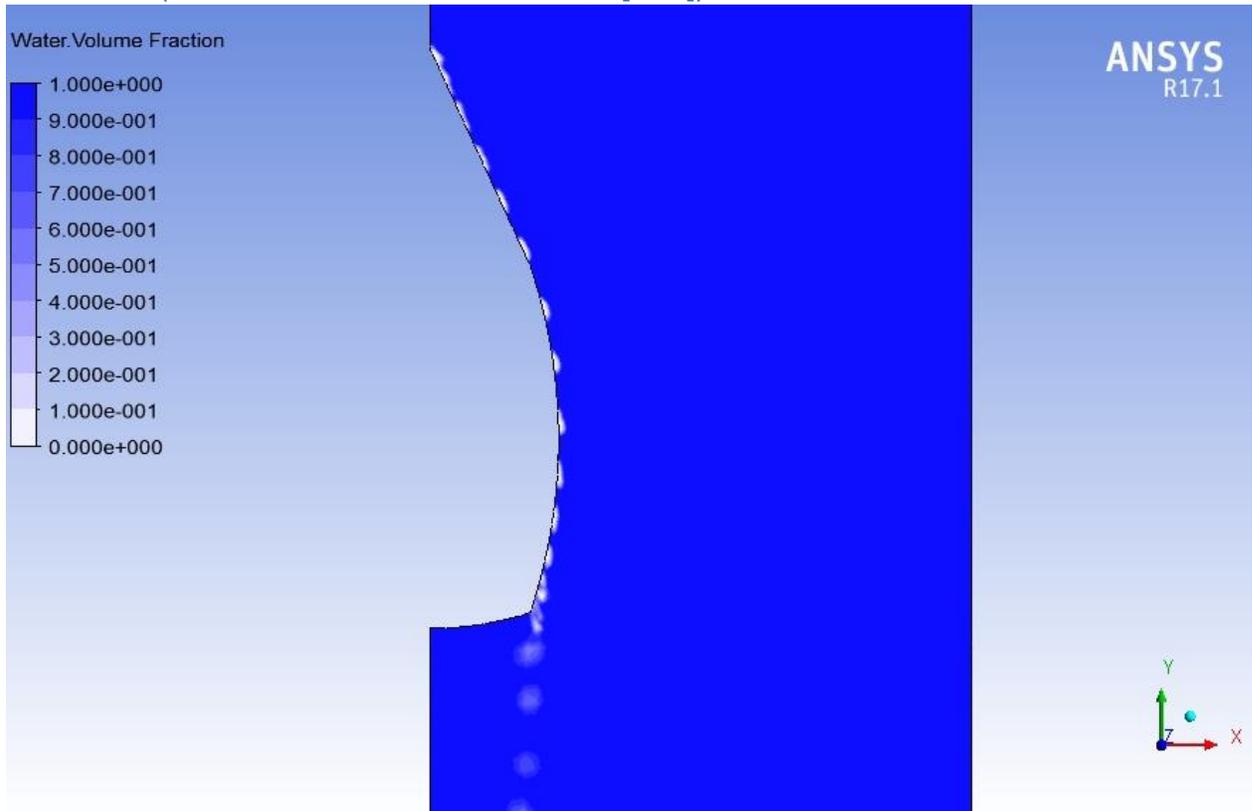


Anexo 31: Concentración de Esfuerzos modelo 6 SIA



Anexo 32: Concentración de Esfuerzos modelo 6 CIA

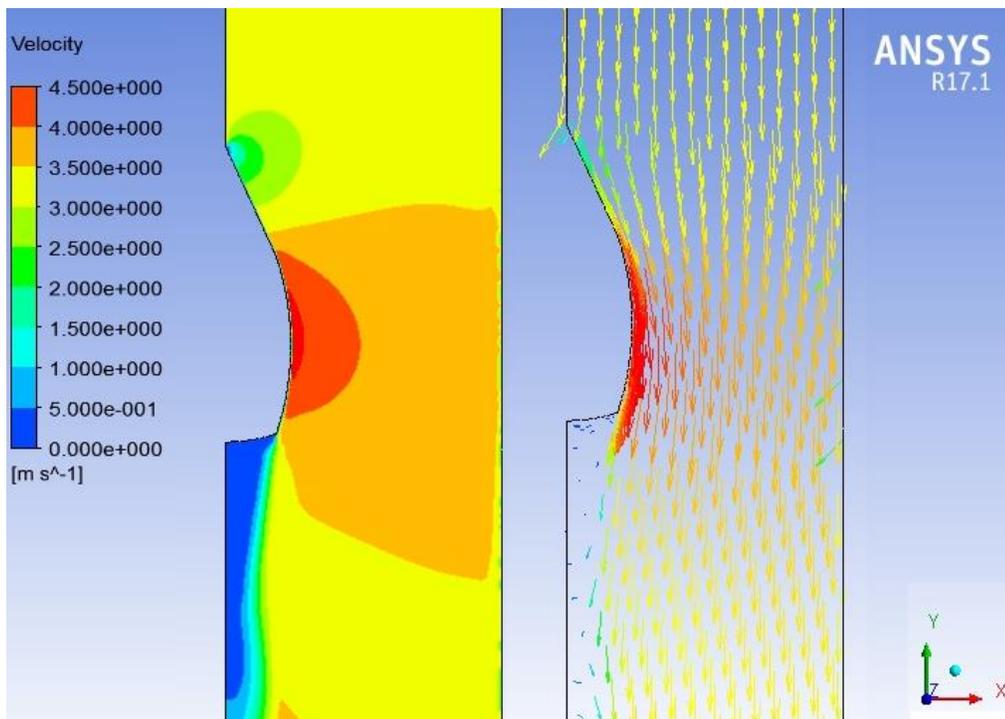
Modelo 8 (Velocidad de movimiento 3,4 [m/s])



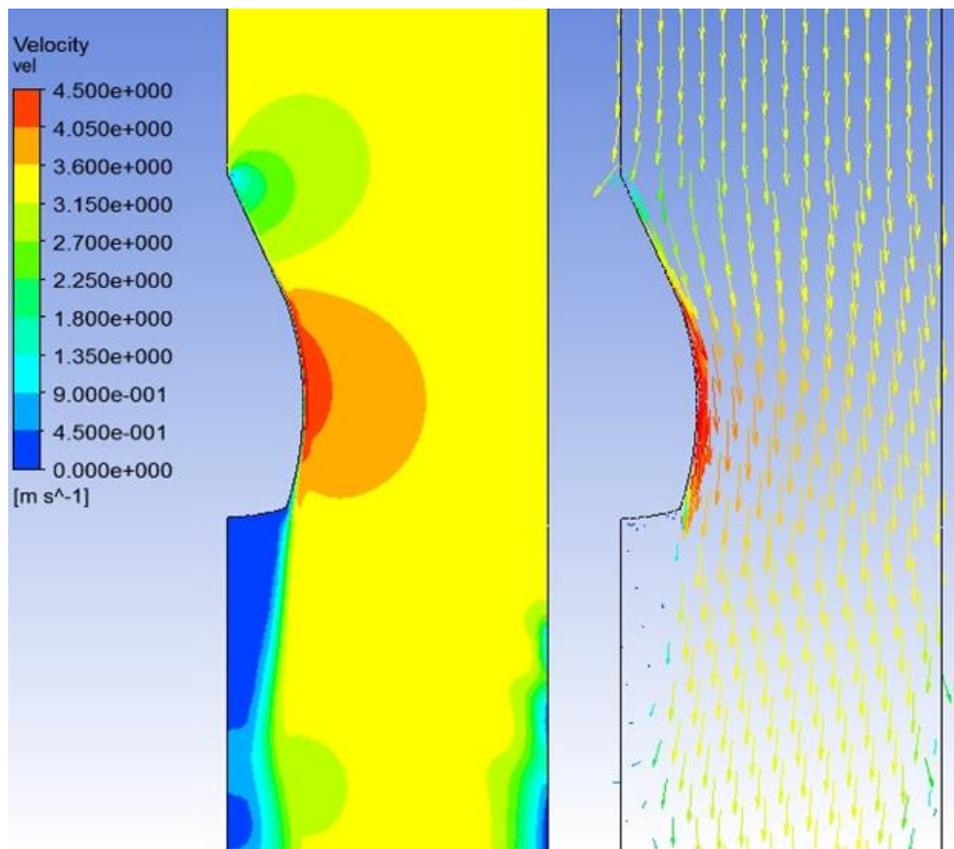
Anexo 33: Diagrama de Fases modelo 8.

Anexo 34: Tabla de reportes de fase modelo 8.

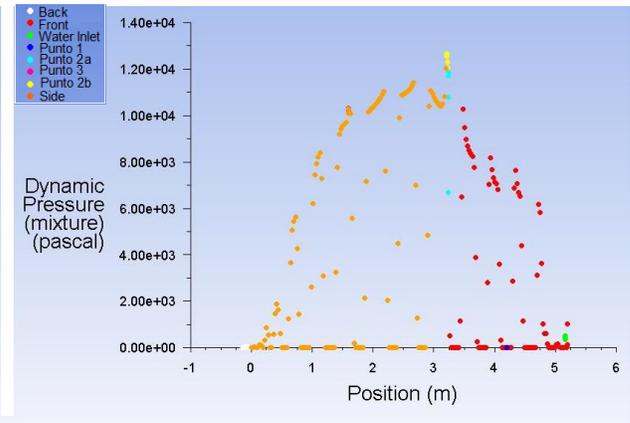
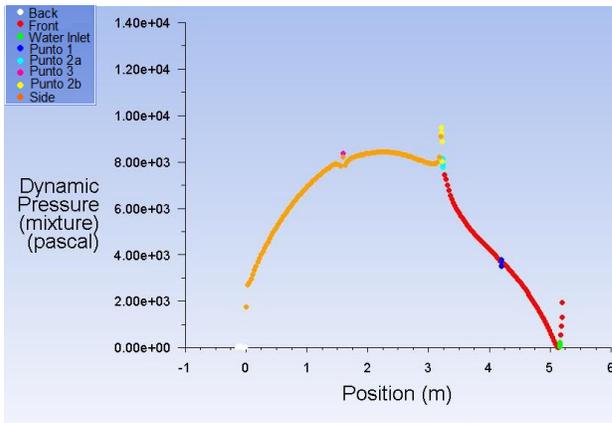
Sección	N de elementos cubiertos por aire	N total de elementos	% de elementos cubiertos por aire
<i>Delantera</i>	65	100	65,0
<i>Lateral</i>	42	118	35,6
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	107	250	42,8



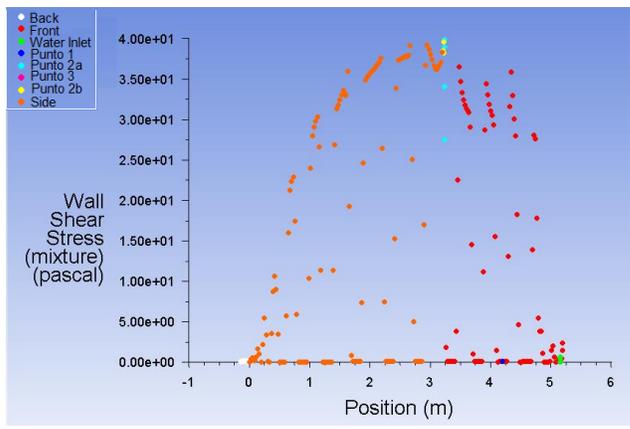
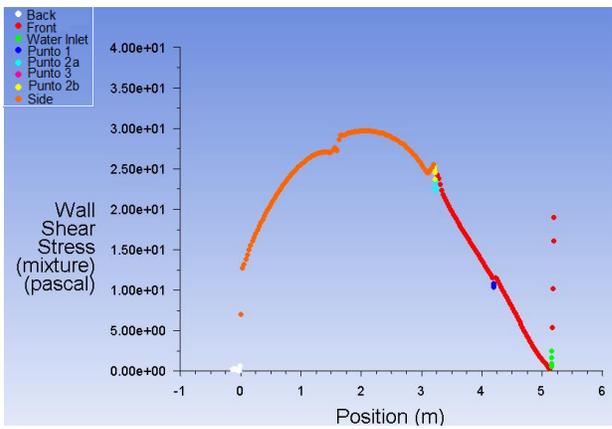
Anexo 35: Capa Limite modelo 8 SIA



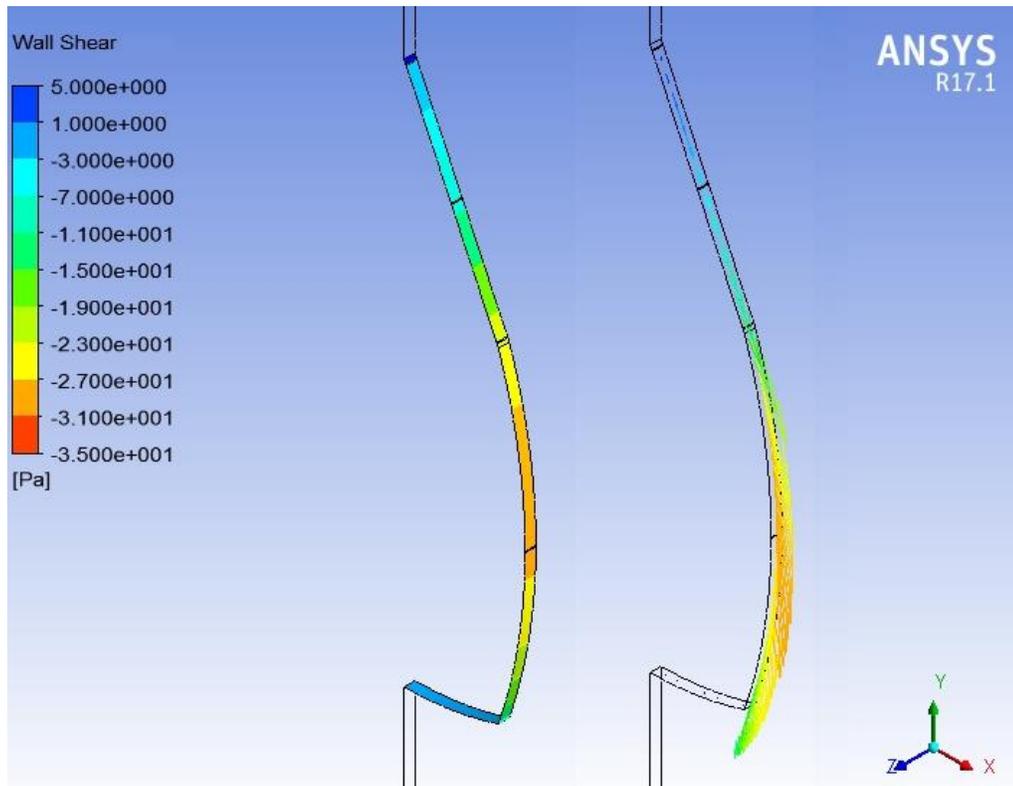
Anexo 36: Capa Limite modelo 8 CIA



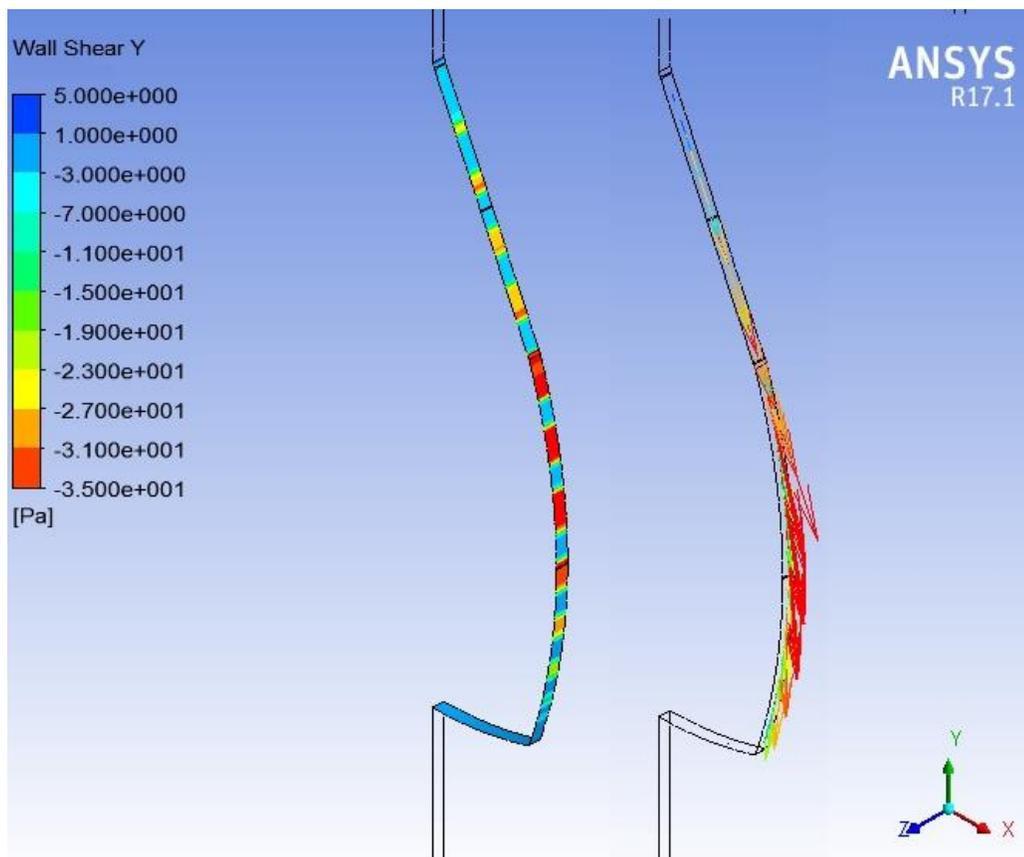
Anexo 37: Gráfico de Presión Dinámica modelo 8 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha)



Anexo 38: Gráfico de Esfuerzos de Corte modelo 8 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha)

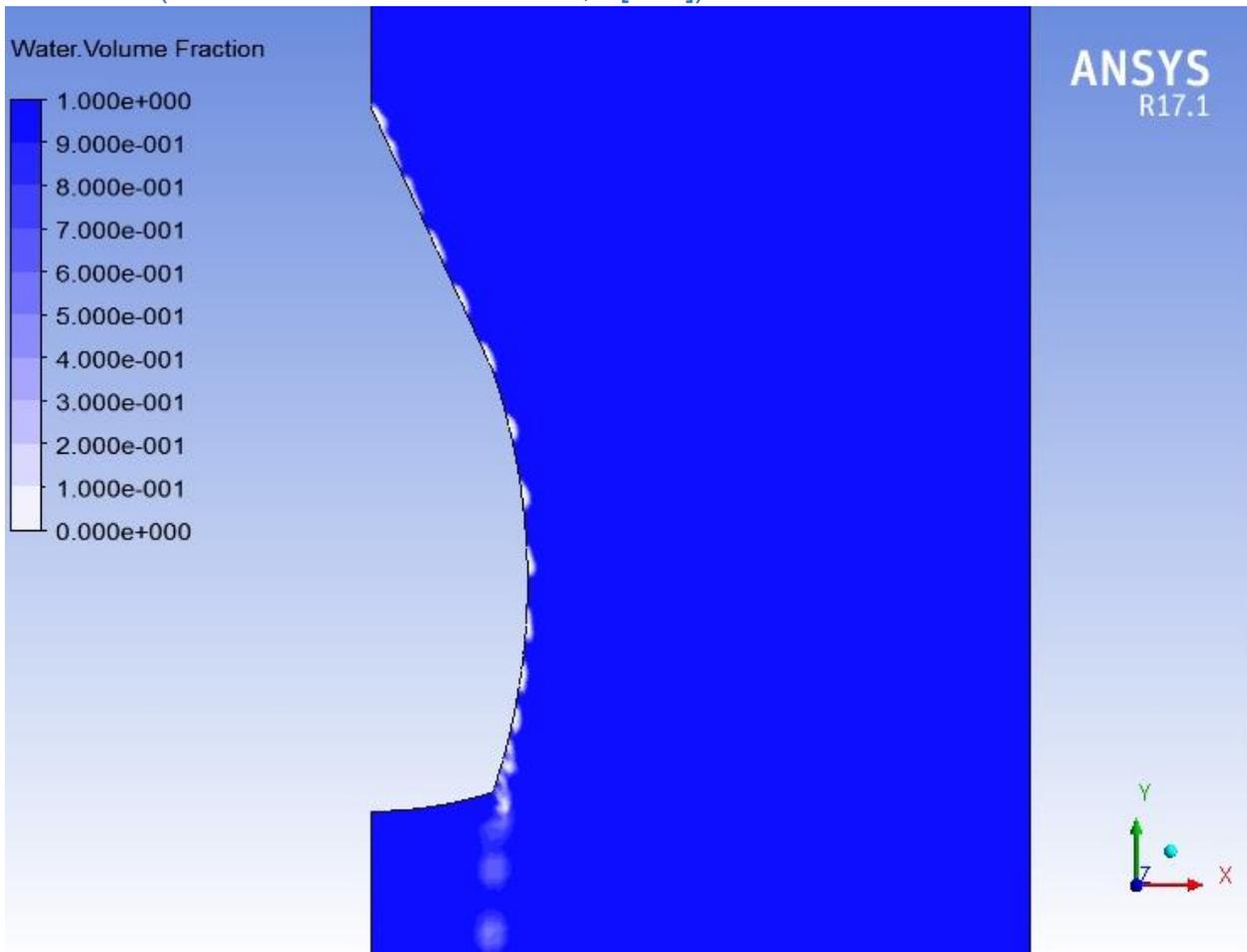


Anexo 39: Concentración de Esfuerzos modelo 8 SIA



Anexo 40: Concentración de Esfuerzos modelo 8 CIA

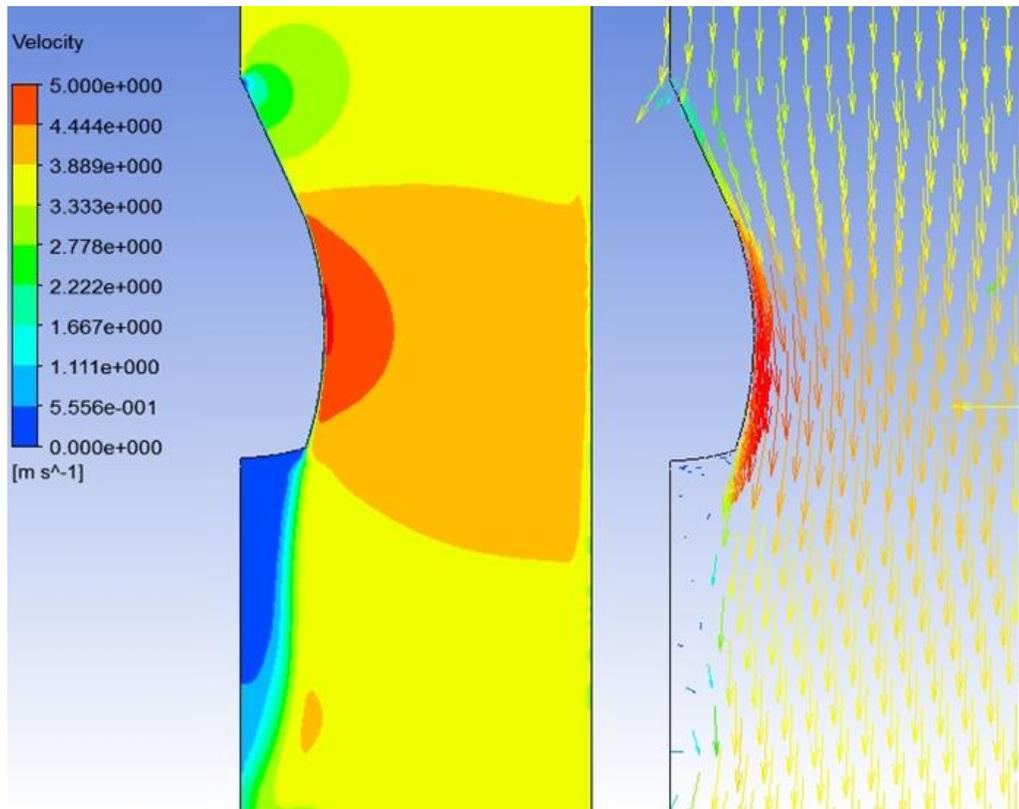
Modelo 9 (Velocidad de movimiento 3,7 [m/s])



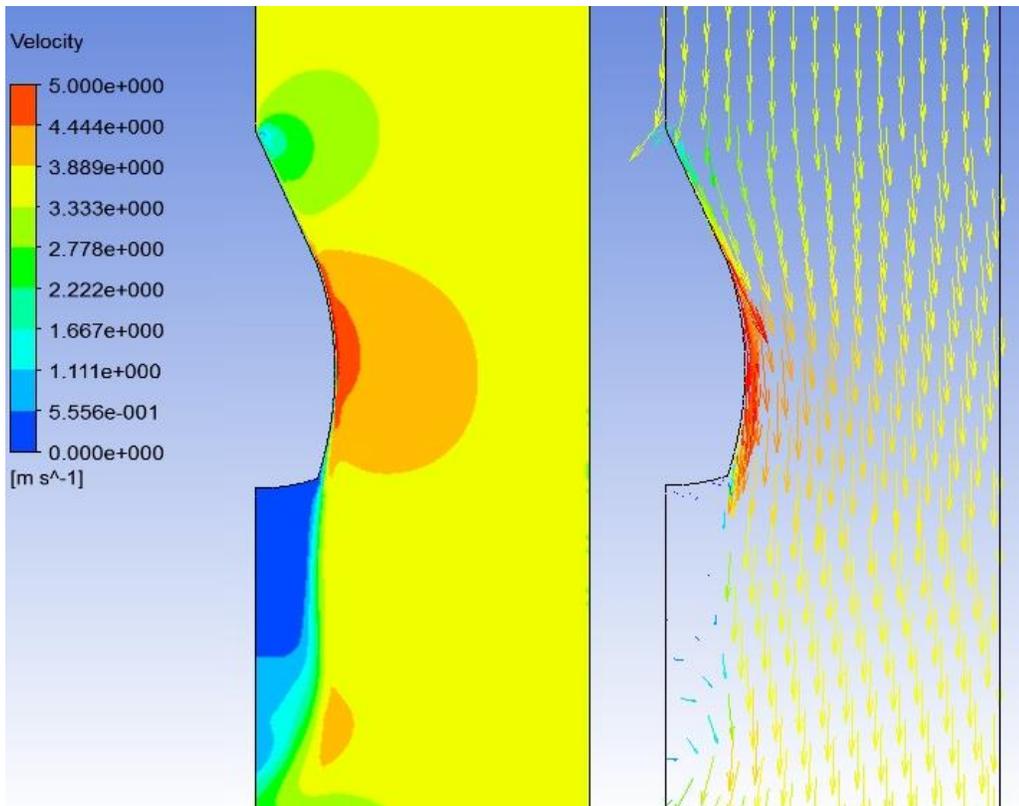
Anexo 41: Diagrama de Fase modelo 9

Anexo 42: Tabla de reportes de fase modelo 9.

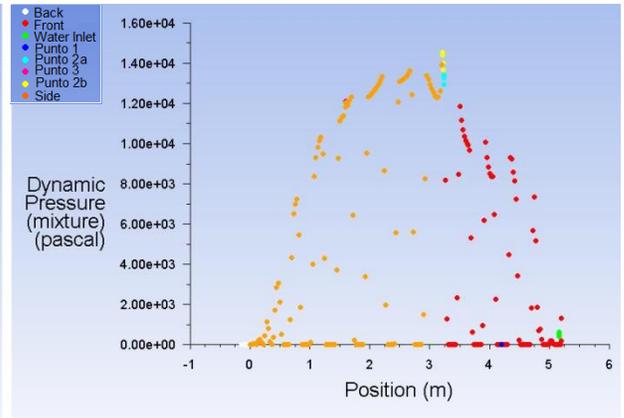
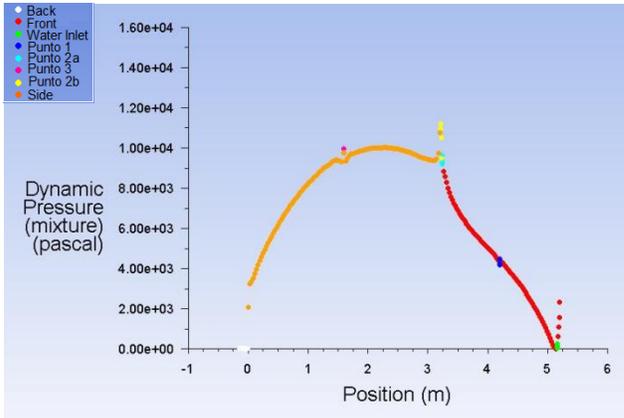
Sección	N de elementos cubiertos por aire	N total de elementos	% de elementos cubiertos por aire
<i>Delantera</i>	65	100	65,0
<i>Lateral</i>	45	118	38,1
<i>Trasera</i>	0	32	0,0
<i>Total</i>	110	250	44,0



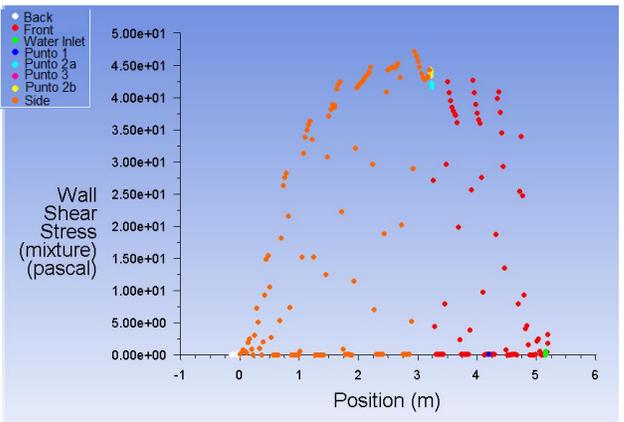
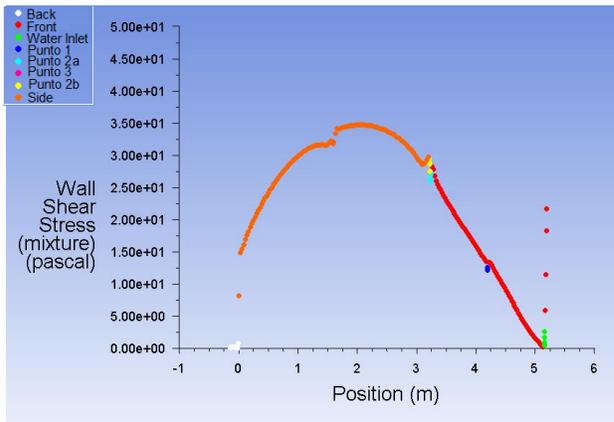
Anexo 43: Capa Limite modelo 9 SIA



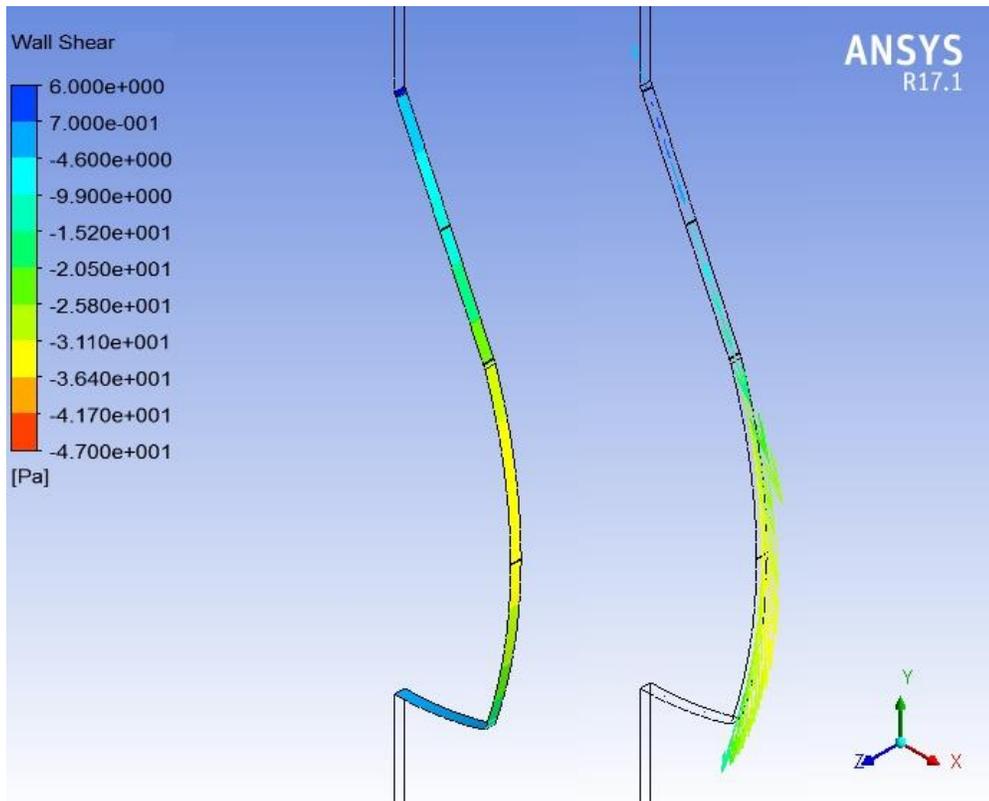
Anexo 44: Capa Limite modelo 9 CIA



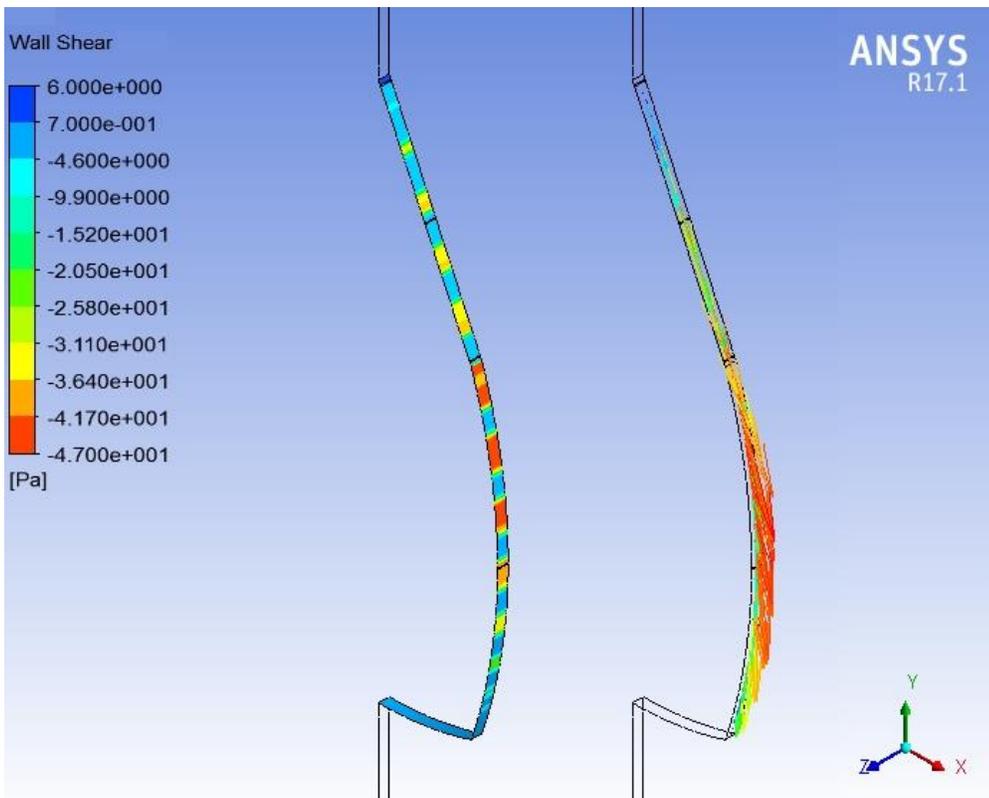
Anexo 45: Gráfico de Presión Dinámica modelo 9 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha)



Anexo 46: Gráfico de Esfuerzos de Corte modelo 9 SIA (a la izquierda) y CIA (a la derecha)



Anexo 47: Concentración de Esfuerzos modelo 9 SIA



Anexo 48: Concentración de Esfuerzos modelo 9 CIA