



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Título

Desarrollo de casos técnicos de fluidotécnica
mediante simulación numérica.

Development of technical cases of fluid dynamics by
numerical simulation

Autor

Cristina Raga Barciela

Director

Jorge Ángel Barroso Estébanez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Curso 2015-2016



DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Cristina Raga Barciela

con nº de DNI 73010500-J en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado en Ingeniería mecánica, (Título del Trabajo)

Desarrollo de casos técnicos de fluidotécnica mediante simulación numérica

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 19 de septiembre de 2016

Fdo: _____

Resumen

En el presente proyecto se ha desarrollado en primer lugar una metodología para facilitar la comprensión de la mecánica de fluidos por medio del análisis de los resultados obtenidos mediante el programa de dinámica de fluidos computacional ANSYS Fluent. La metodología desarrollada está formada por cinco actividades. En primer lugar, empleando una versión para principiantes del programa, se han simulado, por una parte, el flujo interior en una expansión brusca y por otra, el campo de flujo exterior en un perfil alar. En segundo lugar, se ha desarrollado un guion para realizar la simulación del flujo en un codo de mezcla multifásico, donde se explica el software a un nivel intermedio. Los dos últimos casos de esta metodología consisten en dos propuestas de trabajos tutelados, un estudio acerca de la cavitación y otro sobre el transporte neumático de partículas sólidas en fase densa.

La segunda parte de este trabajo se dedica a la simulación con ANSYS Fluent del proceso de mezcla bifásica agua - aire que tiene lugar en el interior de una boquilla de atomización de fluido auxiliar. Se analizan varios casos, tanto bajo la consideración de incompresibilidad para el aire, como para un comportamiento compresible, con diferentes condiciones de contorno. Los análisis realizados permiten valorar la influencia de las condiciones de contorno y otras variables sobre el proceso de mezclado. Se concluye que los efectos de la compresibilidad son muy importantes, mientras que la influencia de la gravedad es despreciable. También se ha observado que lo más conveniente para la obtención de un correcto mezclado es que la diferencia de presiones entre la entrada del agua y la del aire sea lo menor posible.

Índice

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Estado del arte | 3 |
| 3. Introducción de Fluent en asignaturas de mecánica de fluidos | 6 |
| 3.1 Trabajo previo..... | 6 |
| 3.2 Prácticas de laboratorio de mecánica de fluidos | 6 |
| 3.2.1 Expansión brusca en un tubo cilíndrico | 7 |
| 3.2.2 Ensayos aerodinámicos de un perfil alar | 11 |
| 3.3 Práctica de laboratorio para diseño de instalaciones de fluidos | 16 |
| 3.4 Trabajos tutelados para la asignatura Diseño de Instalaciones de Fluidos..... | 20 |
| 3.4.1 Cavitación | 20 |
| 3.4.2 Flujo de aire con partículas sólidas | 24 |
| 4. Proceso de mezcla en un atomizador de fluido auxiliar | 30 |
| 4.1 Geometría..... | 30 |
| 4.2 Extracción del fluido | 31 |
| 4.3 Mallado..... | 32 |
| 4.4 Configuración incompresible. Modelos..... | 32 |
| 4.5 Configuración incompresible. Resultados..... | 33 |
| 4.6 Configuración compresible. Modelos..... | 36 |
| 4.7 Configuración compresible. Resultados | 36 |
| 5. Conclusiones | 45 |
| 6. Referencias | 48 |
| | |
| Anexos | 50 |
| Anexo 1: Práctica de laboratorio. Densidad y líneas de corriente..... | 50 |
| Anexo 2: Práctica de laboratorio. Ensayos aerodinámicos en un túnel de viento . | 73 |
| Anexo 3: Práctica de laboratorio. Flujo multifásico en un codo de mezcla..... | 95 |

1. Introducción

La mecánica de fluidos es una de las ciencias que mayor incidencia ha tenido en el desarrollo de la humanidad, permitiendo analizar y comprender el comportamiento de los sistemas que interactúan con fluidos. La mecánica de fluidos es parte de la física y como tal, es una ciencia que estudia las leyes del movimiento de los fluidos y su interacción con el medio que los rodea.

En ocasiones, la comprensión de un sistema puede resultar compleja, pero debido a la disponibilidad de nuevas tecnologías y al desarrollo de nuevos softwares de simulación computacional esto ha dejado de ser un problema. ANSYS Fluent es un software de dinámica de fluidos computacional que permite obtener soluciones rápidas y precisas, a la vez que permite optimizar el funcionamiento de los sistemas.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- a) Desarrollar una metodología que facilite la comprensión de la mecánica de fluidos a través del análisis de los resultados obtenidos mediante el programa de cálculo de dinámica de fluidos computacional (CFD según su denominación en inglés) ANSYS Fluent. Esta metodología también pretende motivar e iniciar a los alumnos en la simulación fluidodinámica
- b) Realizar un análisis preliminar del proceso de mezcla bifásica que ocurre en una boquilla de atomización de fluido auxiliar mediante simulación fluidodinámica.

Para cumplimentar el primer objetivo se implementa una metodología orientada a la enseñanza introductoria de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), utilizando el software ANSYS Fluent. Esta metodología cuenta con una fase inicial donde se desarrollan dos casos clásicos de mecánica de fluidos, utilizando una versión para principiantes del programa ANSYS Fluent, los cuales se pueden introducir en sendas prácticas de laboratorio de la asignatura Mecánica de Fluidos impartida en los Grados de Ingeniería. El primer caso consiste en la simulación del flujo interior en una expansión brusca, visualizando las líneas de corriente con los vórtices y zonas de recirculación que se producen. El segundo caso es la simulación del campo de flujo exterior en un perfil alar, con la determinación de los coeficientes de arrastre y sustentación. Con los guiones confeccionados para estas dos actividades es posible desarrollar la primera fase de la metodología.

La segunda fase de la metodología de aprendizaje es el empleo del software ANSYS Fluent para realizar simulaciones a un nivel intermedio. Esta fase está compuesta a su vez por dos actividades, una práctica de laboratorio donde se explica el programa de cálculo, y un trabajo tutelado que debe afianzar los conocimientos, tanto del programa de cálculo, como de los aspectos conceptuales de flujos bifásicos simples. Para la primera actividad de esta fase se desarrolla un guion que permite confeccionar la geometría, el mallado e implementar las ecuaciones y condiciones de contorno que permiten simular el flujo en un codo de mezcla multifásico. En esta actividad se explica el software a un nivel intermedio en una práctica de laboratorio de la asignatura de Diseño de Instalaciones de Fluidos (DIF). Para poder cumplimentar la segunda actividad de esta fase de la metodología se elaboran dos propuestas de

trabajos tutelados de carácter general, para su introducción en la misma asignatura DIF, en relación con el estudio de flujos multifásicos. Las propuestas de trabajos tutelados consisten en; un estudio acerca de la cavitación; y otro sobre el transporte con aire de partículas sólidas en fase densa.

Para cumplir el segundo objetivo, el análisis preliminar con ANSYS Fluent del proceso de mezcla bifásica que ocurre en una boquilla de atomización con fluido auxiliar, se realizan las siguientes tareas:

- a) Elaboración de las geometrías en 3D para el estudio del flujo en el interior de la boquilla
- b) Mallado del dominio fluido
- c) Selección de los modelos físicos necesarios para describir el proceso de mezcla bifásica, considerando tanto la opción de flujo incompresible como la de compresible
- d) Ejecución del programa para diferentes condiciones de contorno
- e) Análisis de los resultados obtenidos

2. Estado del arte

A pesar de la elevada utilidad de Fluent, tanto para avanzar en la investigación científico-técnica como para mejorar el aprendizaje de los estudiantes, no es un software de fácil manejo, al igual que los softwares dedicados a la simulación de la dinámica de fluidos. Se requiere mucho esfuerzo y dedicación para alcanzar los conocimientos suficientes que posibiliten el análisis de casos simples sin necesidad de ayuda. A pesar de esto, el programa es muy sistemático, y una vez adquiridos los conocimientos básicos, plantear y resolver problemas simples no resulta demasiado complicado.

En internet existen varias páginas webs con tutoriales que explican paso a paso casos típicos sencillos para comenzar a aprender, y comprender como funciona el programa. Entre estas webs se pueden citar la página de la Universidad de Cornell [12] y la propia web para clientes de ANSYS [1]. Con la aparición de las redes sociales y las facilidades que existe para poder subir videos a la red, también pueden encontrarse infinidad de tutoriales en sitios webs tan conocidos como YouTube [16], donde se pueden ver directamente los pasos a seguir para implementar una simulación determinada, a la vez que se explica el porqué de cada paso. Finalmente, si lo que se desea es un título que acredite los conocimientos adquiridos, la Universidad Politécnica de Madrid ofrece un Master online [15] con el objetivo de formar a expertos en la simulación computacional con este software.

En los últimos tiempos, cada vez es más frecuente encontrar cursos y libros que utilizan la dinámica de fluidos computacional para facilitar la visualización y comprensión de diferentes aspectos de la mecánica de fluidos. De esta manera, en las nuevas ediciones de algunos libros clásicos se están incorporando capítulos dedicados a CFD. Por ejemplo, en la segunda edición del libro de Mecánica de Fluidos de Cengel y Cimbala [11] se dedica un capítulo a la introducción del software Fluent mediante la realización de una serie de casos prácticos.

Al realizar una búsqueda básica en cualquier buscador de artículos científicos que relacionen el programa Fluent con estudios de problemas de ingeniería se obtiene un número elevado de resultados (46800 en ScienceDirect) lo que demuestra el uso de este programa en la actualidad.

Realizando una búsqueda más particular en relación con los contenidos que se imparten en algunas asignaturas básicas de mecánica de fluidos, y que pueden ser de interés para este proyecto, se obtienen los resultados que se desarrollan a continuación.

La asignatura de Mecánica de Fluidos se centra en el estudio de las bases que rigen el comportamiento de los fluidos en su interacción con los objetos que lo rodean. En la búsqueda realizada se han encontrado varios artículos que podrían ser de utilidad para el desarrollo de la primera parte de este proyecto.

En 2015 V. Khandelwal et al [4], publicaron el análisis computacional de las características de un flujo no newtoniano circulando en régimen laminar a través de un canal en T utilizando el software Fluent como herramienta. Los campos de flujo se

explican mediante contornos de líneas de corriente, mostrando que en una de las dos salidas se genera una zona de recirculación. Los autores realizaron varias simulaciones con modificaciones en las condiciones de contorno y concluyeron que, para un particular valor del índice de comportamiento reológico n , la longitud de la zona de recirculación crece al aumentar el número de Reynolds Re , mientras que para un valor fijo de Re , aumenta al disminuir el factor n . Este artículo se puede relacionar con la temática de flujo en canales en la asignatura Mecánica de Fluidos. Por otra parte, la asignatura Diseño de Instalaciones de Fluidos (DIF) se centra en el estudio de los sistemas de medida de flujo y en el comportamiento de los flujos multifásicos. En relación con esta materia, en 2012 S. Sediva y M. Uher [14] realizaron la simulación de un flujo de aire en una tubería circular con un tubo de Pitot promediador, con el objetivo de analizar el efecto de la forma de esta sonda en la pérdida de presión permanente. Probaron cuatro formas distintas, obteniendo como resultado que la forma de la sección transversal afecta a la pérdida de presión permanente, sin embargo, esta es menor que la causada por una placa orificio, y por lo tanto, la forma de la sonda no debería ser tomada como un criterio crítico en el diseño de la sección transversal del tubo de Pitot. Este trabajo está muy relacionado con una práctica de laboratorio de la asignatura DIF, donde se realizan mediciones con un tubo de Pitot y una placa orificio.

Para la parte de transporte de partículas estudiada en la asignatura DIF se podría considerar el siguiente trabajo realizado por V. Akbari et al [3] en 2015, sin embargo, su contenido y complejidad van más allá de los conocimientos impartidos en la asignatura. En este artículo se simula un reactor de polimerización de lecho fluidizado industrial, comprobándose que la distribución del tamaño de partículas desempeña un papel significativo en la eficiencia del reactor. Los modelos de dinámica de fluidos computacional, junto con el modelo de equilibrio de la población (CFD-PBM) han sido ampliamente empleados, resaltando su potencial en el análisis del reactor de polimerización en fase gaseosa a escala industrial utilizando el software ANSYS Fluent. Los resultados predichos revelan un acuerdo aceptable con los datos industriales observados en términos de caída de presión y altura del lecho. Por otra parte, la velocidad mínima de fluidización, así como la tasa de crecimiento de las partículas han sido evaluadas para enfatizar el impacto de la distribución del tamaño de partículas a lo largo del reactor. Los resultados muestran un régimen transitorio en el caso de velocidad de fluidificación mínima. Por otra parte, la simulación indica que, con el fin de mejorar el rendimiento de polimerización, la cantidad y la velocidad del gas se puede aumentar sin que se altere el régimen de fluidización.

En este proyecto también se pretende realizar la simulación mediante Fluent del proceso de mezcla de dos fluidos en un atomizador de tipo "con fluido auxiliar" patentado en el LIFTEC, que actualmente se utiliza para atomizar fuel oil pesado en centrales eléctricas en Cuba. El estudio experimental de este atomizador fue desarrollado en la tesis doctoral de Germán Antonio Ferreira finalizada en febrero del 2010 [13]. En este trabajo se diseñan y construyen las instalaciones experimentales necesarias para el estudio del flujo en el interior de un atomizador industrial, analizando el efecto del flujo másico y las presiones del aire y del líquido en el rendimiento del mismo. También se evalúa la influencia de la configuración

geométrica en el tamaño de las gotas generadas. Finalmente se realiza un estudio numérico preliminar de la interacción del flujo bifásico en el interior de la cámara de mezcla del atomizador, para comprobar la validez de los modelos desarrollados durante la observación experimental. Esta parte del trabajo no se pudo finalizar debido a que no fue posible reducir los residuos de manera satisfactoria. Uno de los objetivos del presente proyecto es mejorar la simulación CFD del proceso de mezcla en la cámara del atomizador estudiado por Ferreira.

Los trabajos de investigación experimental del atomizador objeto de estudio se han publicado en varios artículos de investigadores del LIFTEC, entre los que se pueden citar los publicados por Barreras et al en 2006 [5] y Barroso et al en 2014 [6]. En estas investigaciones se probaron dos tipos de boquillas para atomizar; una de tipo comercial "Y" y una boquilla de doble fluido de nueva concepción. El mejor rendimiento se obtuvo para la boquilla de nueva concepción sin puertos Y en la parte interna, ya que genera un spray con gotas más pequeñas y con un menor flujo másico de aire. Con esto se determinó que la nueva boquilla puede reemplazar ventajosamente a las boquillas tradicionales Y para atomizar líquidos de alta viscosidad.

3. Introducción de Fluent en asignaturas de mecánica de fluidos

3.1. Trabajo previo

La primera parte del proyecto se ha dedicado al aprendizaje del software ANSYS Fluent Academic. En esta etapa se desarrollaron diferentes tutoriales de problemas relevantes de Mecánica de fluidos, según las indicaciones de páginas web especializadas. En primer lugar se simula en 2D el flujo laminar [8] y turbulento [7] en una tubería, comparando los coeficientes de fricción y los perfiles de velocidad adimensional. También se simula el flujo estacionario [9] y no estacionario [10] alrededor de un cilindro infinito (2D), analizando la vorticidad generada aguas abajo en función del tipo de flujo. En el caso estacionario se obtuvieron además los contornos de presión, velocidad, líneas de corriente y coeficiente de arrastre. Por último, se realiza la simulación 3D de la transferencia de calor en un codo de mezcla [2], estudiando cómo varían los contornos de temperatura y velocidad al cambiar ligeramente la geometría de la entrada del flujo caliente.

Con estos trabajos se logra adquirir habilidades suficientes en el manejo del programa, para más adelante abordar la simulación de los casos objeto del presente proyecto.

3.2. Prácticas de laboratorio de mecánica de fluidos

El objetivo de la asignatura Mecánica de Fluidos es proporcionar el conocimiento y las habilidades relacionadas con el flujo de fluidos. Es también la primera toma de contacto de los estudiantes con la dinámica de los fluidos, así que, su enfoque es básico con un programa relativamente amplio.

En lo referente a las prácticas de laboratorio de esta asignatura, se ha comprobado que no se puede focalizar el aprendizaje únicamente en el uso de este software, puesto que es necesario que los estudiantes adquieran también conocimientos de cómo trabajar correctamente en los laboratorios, con instalaciones de fluidos y con la instrumentación de medición. Sin embargo, se está considerando la opción de dedicar cierto tiempo (una parte de dos de las prácticas establecidas) a la introducción y la observación de los resultados que pueden obtenerse con Fluent.

Debido a la complejidad y la limitación de tiempo, estas simulaciones se desarrollan utilizando un par de “Casos de estudio” facilitados por ANSYS, que se incorporan en el programa, de manera que todas las operaciones se llevan a cabo en el entorno ANSYS Workbench (WB) a través de ventanas muy explicadas. Para facilitar el manejo del programa, los productos individuales de ANSYS se ejecutan en segundo plano, y el estudiante sólo ve el entorno del Tutorial. Por lo tanto, la geometría y la malla se crean en ANSYS DesignModeler (DM) y ANSYS Meshing (M), respectivamente, en un segundo plano. La malla se exporta al programa de cálculo de ANSYS FLUENT que también se ejecuta en segundo plano. Las condiciones de contorno y propiedades de flujo se establecen a través de archivos de comandos parametrizados. Los parámetros numéricos que pueden ser modificados por el alumno deben introducirse

con precaución. Para evitar posibles errores se especifican los valores recomendados mínimos y máximos de los parámetros en estudio. El uso de un valor fuera del rango recomendado puede suponer una disminución de exactitud o la imposibilidad de converger a una solución.

En estos “Casos de Estudio” facilitados por ANSYS la interfaz gráfica de usuario (IGU) posee siete pestañas de encabezamiento. Las pestañas se denominan: **Overview, Geometry, Physics, Boundary Condition, Mesh, Solve** y **Report**. En general, la solución al problema progresa desde la izquierda a la derecha de las diferentes ventanas.

El procedimiento para resolver cada caso es:

- Crear la geometría
- Establecer las propiedades del material y las condiciones de contorno
- Mallar el dominio
- Resolver el programa

ANSYS FLUENT resuelve las ecuaciones involucradas en el problema hasta que se cumpla el límite de convergencia o se alcance el número de iteraciones especificado.

3.2.1. Expansión brusca en un tubo cilíndrico

Para facilitar el desarrollo de este caso de estudio en una práctica de laboratorio de la asignatura Mecánica de Fluidos se desarrolla un guion a partir del existente para la Práctica de Laboratorio de Densidad y Tensión superficial. Al guion disponible se le elimina la parte de Tensión superficial y se le incorpora la parte de simulación, donde se explica el manejo del programa de cálculo a un nivel de principiante. El nuevo guion confeccionado se muestra en el Anexo 1.

El objetivo de este caso práctico es comprobar la importancia del número de Reynolds sobre las características cinemáticas del flujo, analizando la influencia de las propiedades físicas (velocidad, densidad y viscosidad) sobre la forma de las líneas de corriente y sobre los fenómenos de separación, recirculación y punto de reconexión.

Planteamiento del problema

Un líquido con densidad ρ y viscosidad μ fluye a través de la expansión brusca con una velocidad de entrada v_1 . Se debe calcular el coeficiente de pérdidas y el comportamiento de las líneas de corriente para diferentes números de Reynolds (Re), prestando especial atención a la influencia del Re sobre la forma de las líneas de corriente.

Detalles de la modelización

En esta práctica se modela una expansión brusca (ver Figura 3.1). La geometría consiste en una pared de la tubería, una línea central (eje), una entrada y una salida. El campo de flujo se supone simétrico con respecto al eje (axisimétrico) de manera que el problema se resuelve en dos dimensiones, analizando la mitad de la tubería para simplificar.

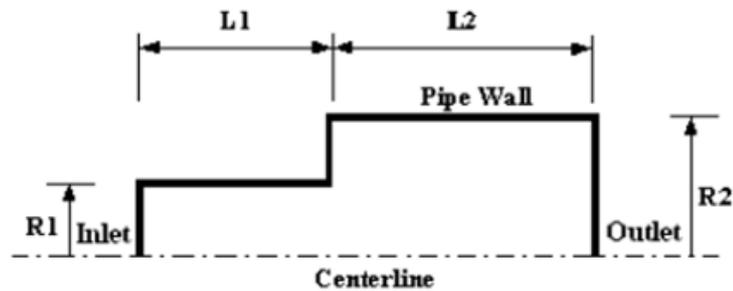


Figura 3.1. Geometría de expansión brusca

La IGU permite modificar los valores del radio y la longitud de las tuberías de entrada y salida. Se pueden seleccionar tres tipos de malla según la densidad de las celdas deseada; fina, media y gruesa. Se puede cambiar la densidad y viscosidad del fluido (dentro de unos límites) y la velocidad de entrada. Con estos valores se obtiene el número adimensional de Reynolds, en función del cual el programa selecciona el modelo físico de simulación más adecuado. Se puede fijar el número de iteraciones y el límite de convergencia, así como seleccionar la localización donde se desee guardar los ficheros. Una vez realizada la simulación se obtiene la presión total en la entrada y en la salida, la velocidad en la salida, y la fuerza de fricción en la pared. También se pueden visualizar los siguientes gráficos: el comportamiento de los residuos durante las iteraciones; la velocidad, la presión estática y la presión total a lo largo de la línea central; la presión estática, la presión total, y los esfuerzos cortantes a lo largo de la pared del tubo; y por último, los perfiles radiales de la velocidad axial en diferentes planos XY. Además se pueden visualizar los contornos de presión, de velocidad y las líneas de corriente. También está disponible una figura con los vectores de velocidad axial.

Principios a observar

Cuando un fluido circula a través de una expansión brusca con una elevada inercia (número de Reynolds alto), las partículas de fluido tras la expansión son forzadas hacia el exterior de manera que el flujo pierde el contacto con la pared. A causa de esta separación del flujo, se genera una zona de baja presión justo en la primera parte de la pared tras la expansión. Esta caída de presión hace que el fluido recircule en esa región denominada "zona de recirculación" (ver Figura 3.2).

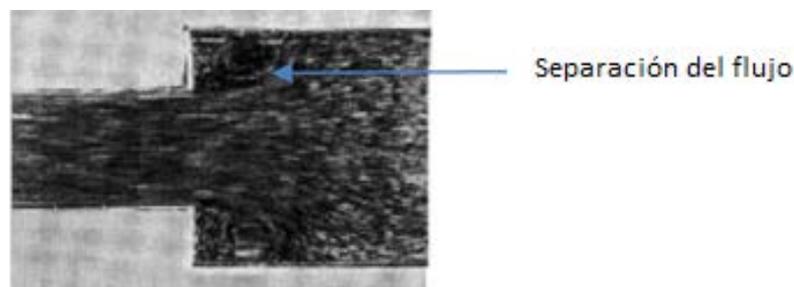


Figura 3.2. Imagen de la separación del flujo en una expansión brusca

En la figura 3.3 se puede localizar el punto de separación (**Separation point**), la zona de recirculación (**Recirculation zone**) y el punto de reconexión del flujo a la pared (**Reattachment point**).

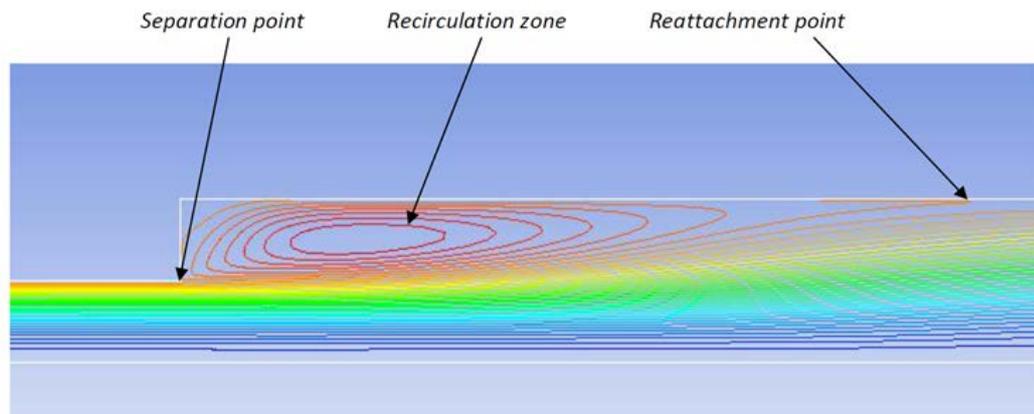


Figura 3.3. Líneas de corriente con la zona de recirculación debido a la separación del flujo

La recirculación del flujo supone una pérdida de la energía del fluido, lo que conlleva una significativa caída de presión, aumentando el coeficiente de pérdidas (k). El valor del coeficiente de pérdidas depende de la razón de expansión geométrica (relación entre el diámetro de salida y el de entrada) y el número de Reynolds. Generalmente en un sistema de tuberías se desea minimizar la caída de presión, reduciendo así, la separación del flujo y con ello la pérdida de energía.

En esta simulación es posible evaluar los efectos que ocasiona la separación de la capa límite sobre las líneas de corriente y sobre el coeficiente de pérdidas.

La razón de expansión se determina por la siguiente ecuación,

$$RE = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.1)$$

Donde R_1 y R_2 son los radios del tubo antes y después de la expansión brusca.

El coeficiente de pérdidas se puede determinar por la siguiente ecuación empírica en función de la razón de expansión RE ,

$$k = \left(1 - \frac{1}{RE^2}\right)^2 \quad (3.2)$$

Observando la ecuación (3.2) se aprecia que el aumento de la razón de expansión provoca el incremento del coeficiente de pérdidas, lo que se debe principalmente a la separación del flujo en la expansión.

Debido a la limitación de tiempo no se pretende visualizar con Fluent cómo afecta la razón de expansión a la zona de recirculación, centrandolo estudio de simulación en la influencia del número de Reynolds.

El coeficiente de pérdidas se calcula para diferentes valores del número de Reynolds con una $RE = 2$ mediante las simulaciones. El número de Reynolds se ajusta variando la velocidad de entrada y manteniendo todos los demás parámetros constantes.

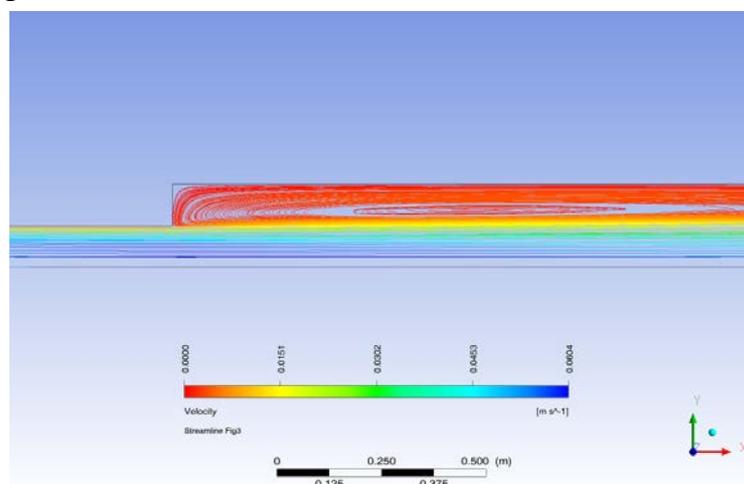
Planteamiento de casos para la parte de simulación

Con el fin de observar cómo afecta a la zona de recirculación la variación del número de Reynolds, el alumno debe realizar la simulación de un flujo de aire con al menos cinco velocidades diferentes, manteniendo el resto de parámetros constantes, asegurándose de introducir valores que abarquen desde el régimen laminar

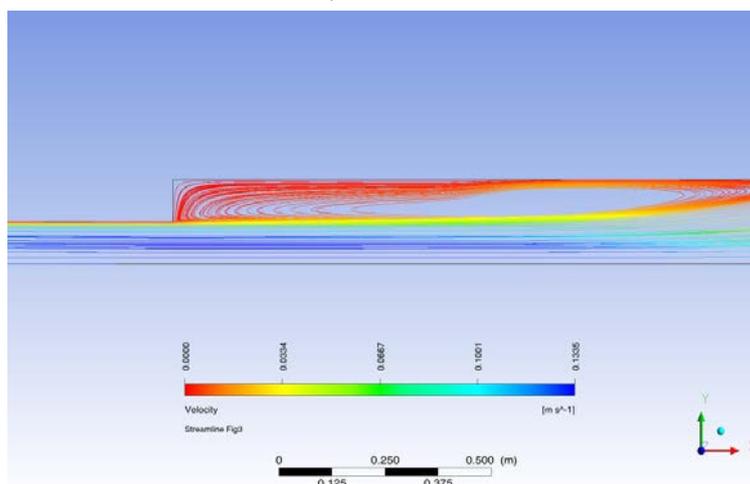
($Re < 2300$) hasta el turbulento ($Re > 4000$). En flujo laminar las partículas de fluido, al llevar una inercia baja, permanecen más unidas a la pared, y al flujo le cuesta separarse. Para bajos Re la pérdida de energía y la caída de la presión son insignificantes. Al aumentar el Reynolds, aumenta la inercia, y se incrementa la recirculación del flujo, lo que provoca un aumento del coeficiente de pérdidas. En régimen turbulento, a partir de un cierto valor del Re , sucesivos incrementos no modifican significativamente el valor del coeficiente de pérdidas.

Para cada número de Reynolds, el alumno debe analizar el comportamiento de las líneas de corriente y de los vectores de velocidad, así como, del coeficiente de pérdidas.

En la Figura 3.4 se puede apreciar que la zona de recirculación aumenta de tamaño cuando se incrementa el número de Reynolds en régimen laminar. Como se aprecia en la figura, el tamaño de la zona de recirculación aumenta con el Re .



a) $Re = 597$



b) $Re = 1500$

Figura 3.4. Líneas de corriente para distintos números de Reynolds.

Con el objetivo de visualizar si para diferentes fluidos con un mismo número de Reynolds, el comportamiento cinemático del flujo es el mismo, el estudiante debe ejecutar el programa con agua, modificando la velocidad hasta lograr que el número de Reynolds sea igual a uno de los seleccionados en el caso anterior para aire. Deberá

analizar los gráficos de las líneas de corriente obtenidos y los perfiles de velocidad en las diferentes zonas.

El resultado del análisis anterior se muestra en la Figura 3.5 donde se puede apreciar que el comportamiento cinemático del flujo es el mismo a pesar de ser dos fluidos diferentes, aunque se aprecia en la escala que la velocidad es distinta.

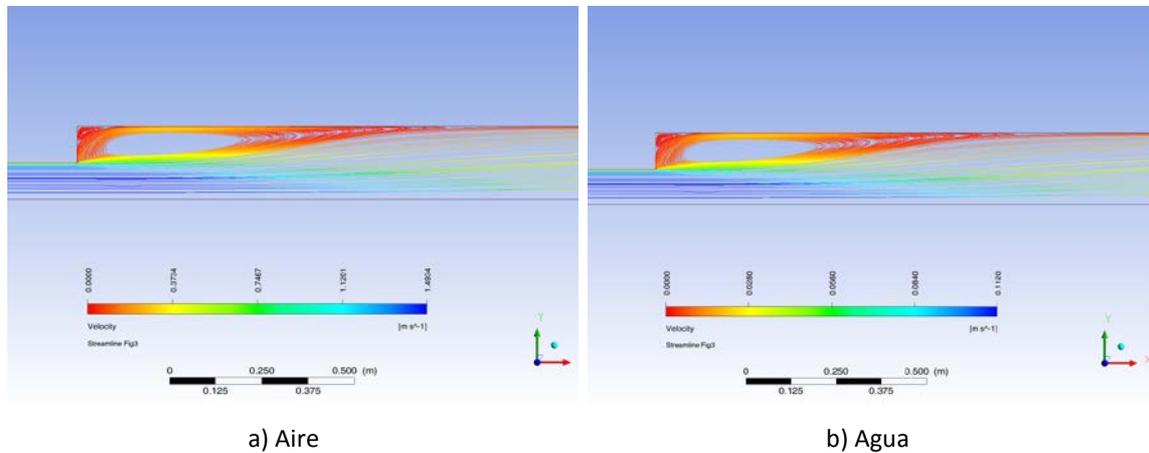


Figura 3.5. Líneas de corriente de distintos fluidos con el mismo número de Reynolds

3.2.2. Ensayos aerodinámicos de un perfil alar

Para facilitar el desarrollo de este caso de estudio en una práctica de laboratorio de la asignatura Mecánica de Fluidos se desarrolla un guion a partir del existente para la Práctica de Laboratorio de Aerodinámica y Túnel de viento. Al guion disponible se le elimina la parte dedicada al estudio de fuerzas de arrastre sobre diferentes objetos y se le incorpora la parte de simulación, donde se explica el manejo del programa de cálculo a un nivel de principiante. El nuevo guion confeccionado se muestra en el Anexo 2.

El objetivo de este caso práctico es evaluar la importancia del ángulo de ataque sobre los coeficientes de arrastre y sustentación de un perfil alar.

Planteamiento del problema

Un gas ideal con viscosidad μ fluye sobre un perfil aerodinámico ClarkY con número de Mach M . Se crea un dominio computacional alrededor de la superficie de sustentación ClarkY que tiene longitud de cuerda C . Se deben evaluar las características de sustentación de la superficie ClarkY, la variación de la sustentación con el ángulo de ataque (α) y la distribución de la presión en la superficie de sustentación.

Detalles de la modelización

En esta práctica se modela un perfil aerodinámico ClarkY creado a partir de un conjunto de puntos conectados mediante una curva suave. Se supone flujo bidimensional y se crea un dominio de flujo que rodea a la superficie de sustentación. En las figuras 3.6 y 3.7 se puede observar la geometría del perfil y el dominio mallado que lo rodea, respectivamente.

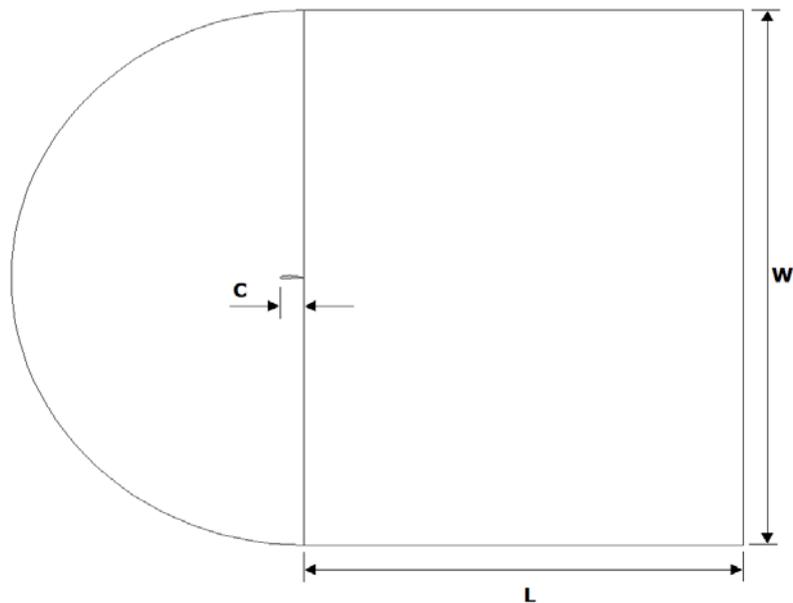


Figura 3.6. Esquema de flujo sobre la superficie de sustentación ClarkY y el dominio de flujo

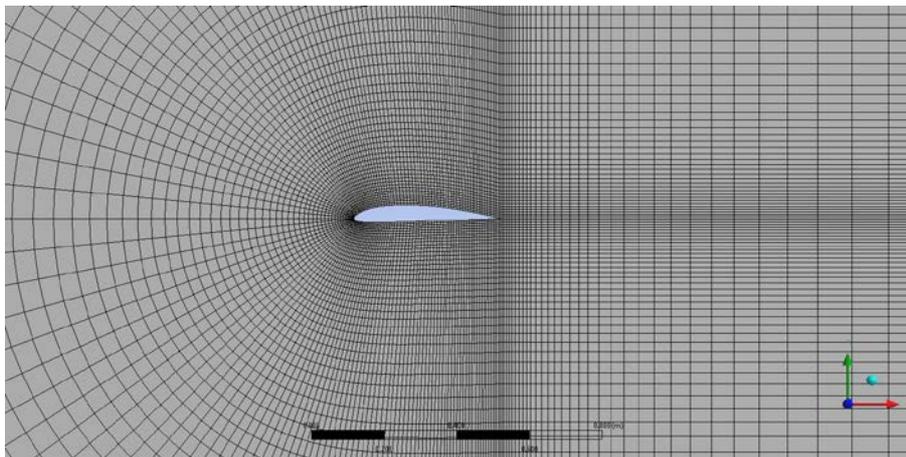


Figura 3.7. Malla generada por ANSYS ACADEMIC CFD

La IGU no permite modificar el valor de la longitud de la cuerda del perfil aerodinámico que tiene un valor fijo de 0.4036 m. Se pueden seleccionar tres tipos de malla según la densidad de celdas deseada; fina, media o gruesa. Sobre la superficie de sustentación se puede seleccionar tanto un campo de flujo viscoso como uno no viscoso. Se considera que el fluido es aire asumiendo comportamiento de gas ideal. En las condiciones de contorno se puede especificar la temperatura, la presión, el número de Mach en el campo lejano y el ángulo de ataque. Además se pueden fijar el número de iteraciones y el límite de convergencia, así como, seleccionar la localización donde se desee guardar los ficheros. Una vez realizada la simulación se obtiene el esfuerzo cortante en la pared, el factor de fricción en la superficie, el coeficiente de sustentación, y el coeficiente de fricción. También se generan gráficas del coeficiente de presión, del coeficiente de fricción, y de la distribución del esfuerzo cortante. Además, se pueden mostrar los contornos de presión, velocidad, temperatura, función de corriente, la energía cinética turbulenta y la razón de disipación. También se puede visualizar una figura con los vectores de velocidad.

Principios a observar

Un fluido que circula entorno a una superficie sólida es un flujo externo (no confinado). El interés en este tipo de flujos consiste en determinar las fuerzas originadas sobre las superficies sólidas. Cuando un cuerpo sólido se mueve en el seno de un fluido, se puede considerar que el objeto está estático y que es el fluido el que se mueve en sentido contrario con la misma velocidad.

El arrastre F_D y la sustentación F_L se definen como las componentes de la fuerza ejercida por un fluido en movimiento sobre un cuerpo, en las direcciones paralela y normal, respectivamente, a la velocidad del fluido relativa al cuerpo. Tanto el arrastre como la sustentación tienen dos componentes: una que se origina por las diferencias de presión (*de presión o de forma*), y la otra que resulta de los esfuerzos cortantes (*de superficie o viscosa*). En la Figura 3.8 se pueden observar estas fuerzas.

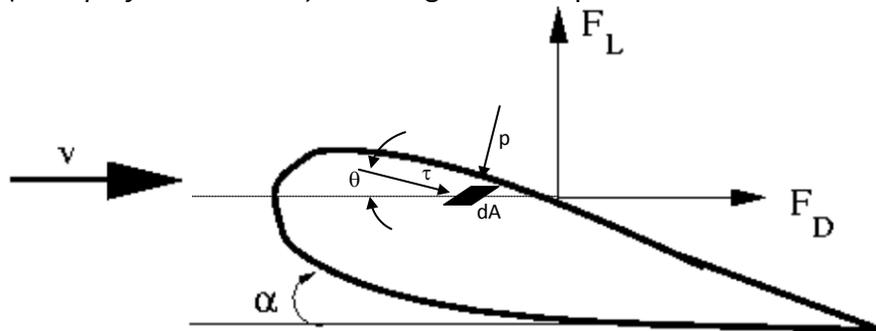


Figura 3.8. Fuerzas existentes en un perfil aerodinámico inmerso en una corriente

Fuerza y coeficiente de arrastre

La fuerza de arrastre F_D es la componente de la fuerza que sigue la dirección de la velocidad incidente. A partir de esta fuerza se define un coeficiente de arrastre adimensional:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (3.3)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, V su velocidad y A es el área en planta, es decir, el área en la dirección perpendicular a la cuerda, $A = cb$ (ver Figura 3.9).

En general el coeficiente de arrastre depende de la geometría del cuerpo y del número de Reynolds para flujos incompresibles. El número de Reynolds se define como

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (3.4)$$

Siendo D una longitud característica del cuerpo que para estos perfiles se considera la cuerda, μ es la viscosidad del fluido y ν es la viscosidad cinemática.

El coeficiente de arrastre depende del número de Reynolds, si éste es bajo. Por el contrario, si el Re es elevado, esta dependencia desaparece, ya que la resistencia se debe principalmente a la separación del flujo en forma de estela aguas abajo del cuerpo.

Fuerza y coeficiente de sustentación

La fuerza de sustentación es la componente de la fuerza ejercida por el flujo sobre el cuerpo, en la dirección perpendicular a la velocidad. A partir de esta fuerza se define un coeficiente adimensional de sustentación, de forma similar al de arrastre,

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \tag{3.5}$$

Cuando se tratan conjuntamente las componentes de la fuerza arrastre y sustentación, por lo general, se emplea el área en planta del objeto, tanto para el coeficiente arrastre C_D como para el de sustentación C_L . Así que en los perfiles alares, donde la componente mayor es la fuerza de sustentación, el área característica se corresponde con la proyección del objeto en la dirección perpendicular a la cuerda.

El coeficiente de sustentación, al igual que el de arrastre, depende de la geometría del cuerpo y del número de Reynolds para flujo incompresible. La dependencia con el número de Reynolds es similar a la del coeficiente de arrastre. La geometría es un factor muy importante en la sustentación. El ángulo de ataque (α) y las dimensiones características en un perfil aerodinámico se muestran en la Figura 3.9.

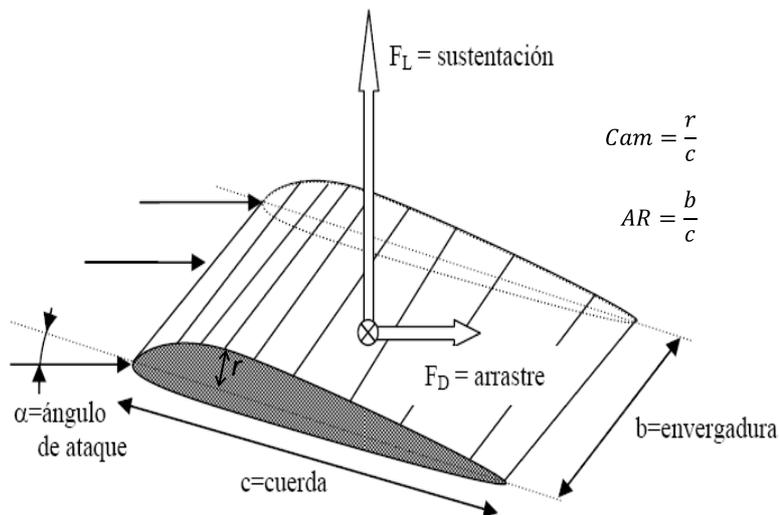
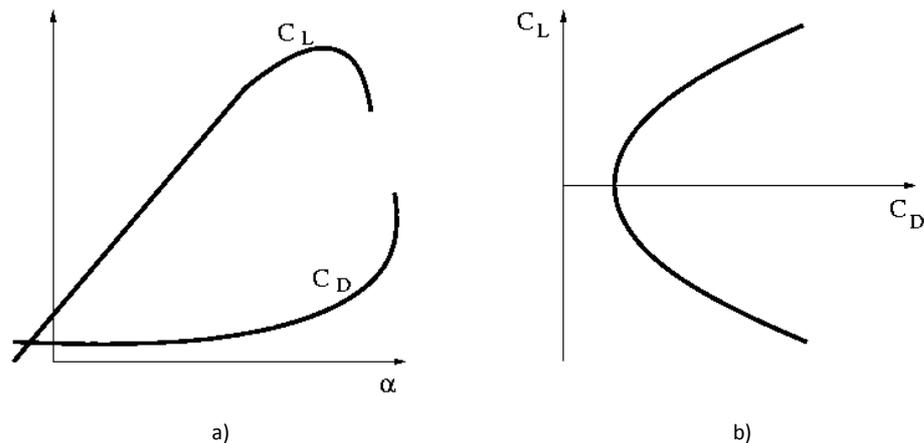


Figura 3.9. Perfil aerodinámico. El parámetro Cam es la relación entre la curvatura y la cuerda del perfil, mientras que AR es la relación de forma del perfil.

Al estudiar perfiles aerodinámicos se comprueba que la fuerza de sustentación depende fuertemente del ángulo de ataque y que para ángulos pequeños esta fuerza es mayor que la de resistencia. En la Figura 3.10 se muestran las curvas típicas de un perfil aerodinámico. En primer lugar la variación de los coeficientes de arrastre y sustentación en función del ángulo de ataque (Figura 3.10 a) y después la variación del coeficiente de sustentación en función del de arrastre. Esta curva de C_L en función de C_D recibe el nombre de polar del perfil aerodinámico (Figura 3.10 b).



a) Comportamiento con el ángulo de ataque b) Polar del perfil aerodinámico

Figura 3.10. Curvas características de un perfil aerodinámico

Como se puede observar en la Figura 3.10 a) el coeficiente de sustentación aumenta de forma aproximadamente lineal con el ángulo de ataque hasta que se produce la llamada *pérdida*, momento en el que disminuye bruscamente. Para ángulos de ataque superiores al valor de pérdida, ambos coeficientes, el de arrastre y el de sustentación, adquieren valores similares. El ángulo en el que se produce la pérdida depende de la forma del perfil y del número de Reynolds, pero generalmente está cercano a los 15 grados.

En esta simulación no se modifica la orientación del perfil, sino la dirección de la velocidad, y como se ha comentado la fuerza de arrastre se genera en la dirección de la velocidad y la de sustentación perpendicular a esta. Para ángulos de ataque mayores que 0° es necesario tener en consideración que los coeficientes de arrastre (**Drag coefficient**) y sustentación (**Lift**) que obtiene el programa están determinados en la dirección x y en la dirección y , respectivamente. Para poder determinar los coeficientes de arrastre y sustentación correctos (en la dirección de la velocidad) se deben utilizar las siguientes ecuaciones, obtenidas a partir del balance de fuerzas en las direcciones x e y .

$$C_{D\alpha} = C_{Ly} \sin \alpha + C_{Dx} \cos \alpha \quad (3.6)$$

$$C_{L\alpha} = C_{Ly} \cos \alpha - C_{Dx} \sin \alpha \quad (3.7)$$

Donde C_{Dx} y C_{Ly} son los coeficientes que reporta el programa y α el ángulo de ataque.

Planteamiento de casos para la parte de simulación

Con el fin de observar la variación de los coeficientes de sustentación y arrastre para diferentes ángulos de ataque y la *pérdida* que se produce, los estudiantes deben realizar la simulación con las condiciones de contorno fijadas en el caso base modificando únicamente el ángulo de ataque. Con los resultados obtenidos, se calculan los coeficientes de arrastre y sustentación reales mediante las ecuaciones 3.6 y 3.7, respectivamente. Finalmente se confeccionan las curvas que relacionan estos

coeficientes con el ángulo de ataque, obteniéndose un resultado similar al que se muestra en la Figura 3.11.

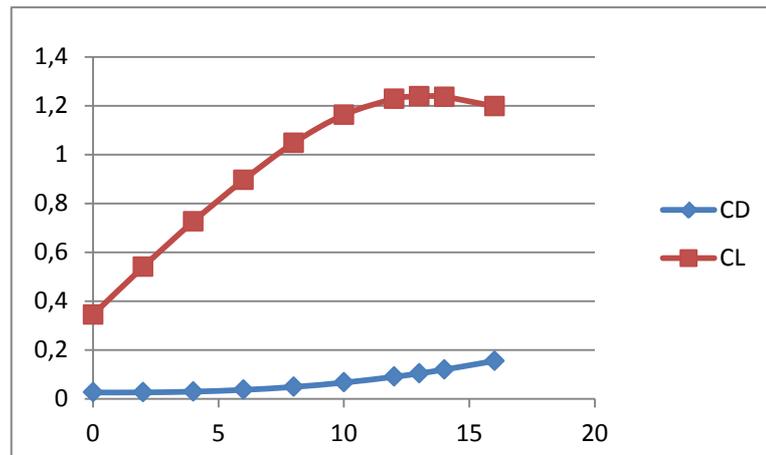


Figura 3.11. Comportamiento de los coeficientes de arrastre y sustentación con el ángulo de ataque

3.3. Práctica de laboratorio para diseño de instalaciones de fluidos

Con el fin de explicar el software a un nivel intermedio en una práctica de laboratorio de la asignatura de Diseño de Instalaciones de Fluidos (DIF) se considera el caso del flujo multifásico en un codo de mezcla. El guion confeccionado para realizar este caso se encuentra disponible en el Anexo 3.

La geometría del codo de mezcla considerado se muestra en la Figura 3.12.

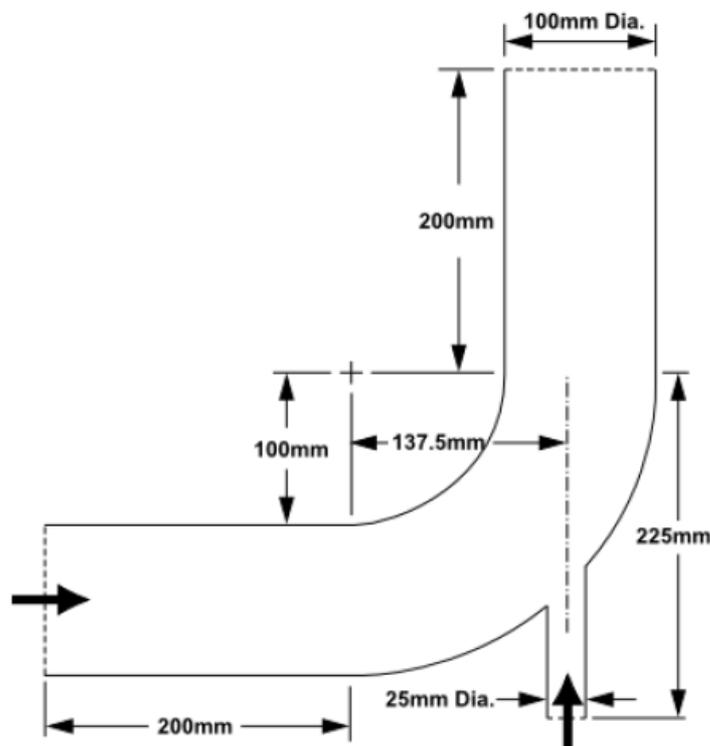


Figura 3.12. Especificación del problema

La geometría está formada por un codo principal, por cuya entrada se introduce agua a una velocidad de 0.4 m/s. Este codo tiene incorporada una pequeña entrada lateral por la que se introduce benceno con una velocidad de 1.1 m/s.

Creación de la geometría

La geometría de este problema consiste en una tubería grande principal y una tubería pequeña lateral. El modelador de diseño de ANSYS está provisto de una serie de geometrías básicas que pueden combinarse para crear rápidamente geometrías como la que se pretende estudiar. Para realizar la figura es necesario crear la curva de la tubería principal definiendo un segmento de un toroide, extruir las caras del segmento del toroide para formar las prolongaciones de la entrada y la salida, y por último, crear la tubería lateral añadiendo un cilindro básico.

Con el fin de reducir los cálculos computacionales se usa la herramienta de simetría para reducir el modelo a la mitad.

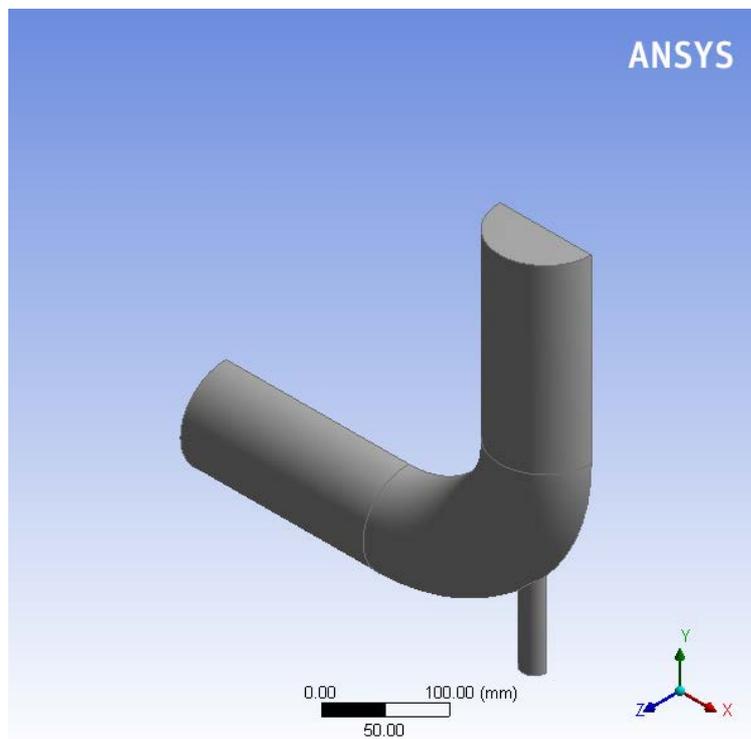


Figura 3.13. Mitad simétrica del codo.

Por defecto, el programa considera que la geometría es un sólido, así que es necesario modificarlo a fluido.

Mallado de la geometría

En esta sección la geometría se malla con un total de 35024 nudos y 118557 elementos y se crean los nombres de las diversas partes de la geometría.

En primer lugar se debe crear los nombres para las distintas partes del codo: la entrada grande que se denomina "velocity-inlet-large", la entrada pequeña lateral "velocity-inlet-small", la salida de la tubería principal "pressure-outlet" y el plano de simetría "symmetry". Por último, se crea el nombre del cuerpo del fluido "Fluid".

Configuración física

En este apartado se especifican las ecuaciones que gobiernan y las condiciones de contorno para el problema. Esta simulación será de tipo basada en la presión, con una formulación de velocidad absoluta, estacionaria en el tiempo y sin considerar la gravedad.

Se activan el modelo multifásico **mixture** y el modelo turbulento k-epsilon. En este último modelo se selecciona un tratamiento mejorado próximo a las paredes.

Para este ejercicio se va a utilizar agua líquida y benceno de manera que es necesario buscar sus propiedades en la base de datos de Fluent. Una vez guardados estos fluidos se determinan las fases que compondrán el flujo multifásico. En este caso, se define el agua como fase primaria y el benceno como fase secundaria.

Se configuran las condiciones de contorno de la siguiente forma: por la entrada grande se introduce agua a una velocidad de 0.4 m/s, por la entrada pequeña lateral benceno a 1.1 m/s. La salida se considera a presión atmosférica.

Resultados a través del post-procesador

En las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 se muestran, respectivamente, los contornos de velocidad, densidad y presión para estas condiciones de contorno.

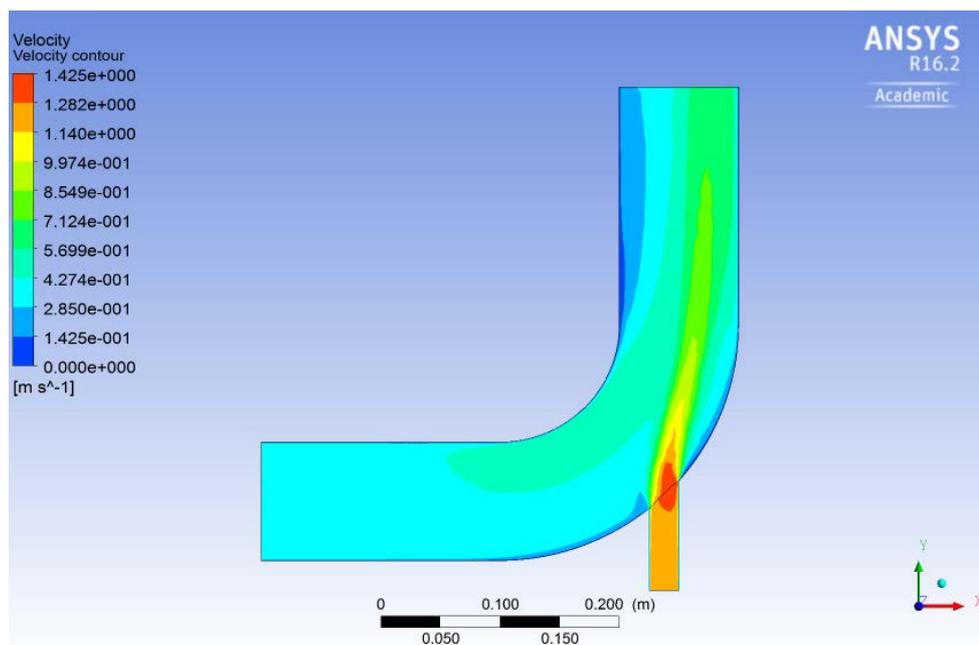


Figura 3.14. Contorno de velocidad

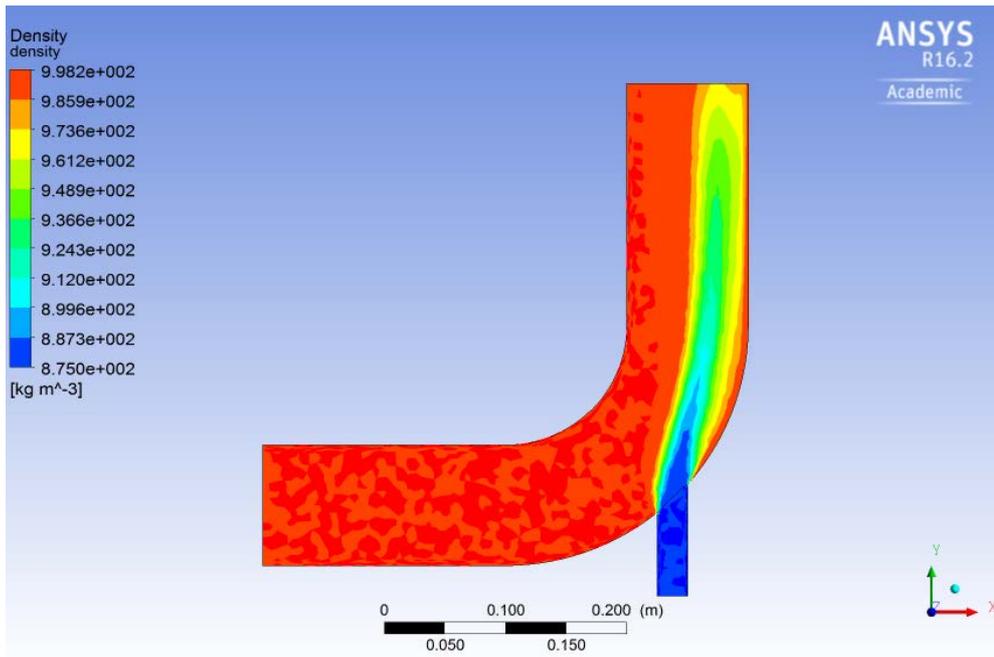


Figura 3.15. Contorno de densidad

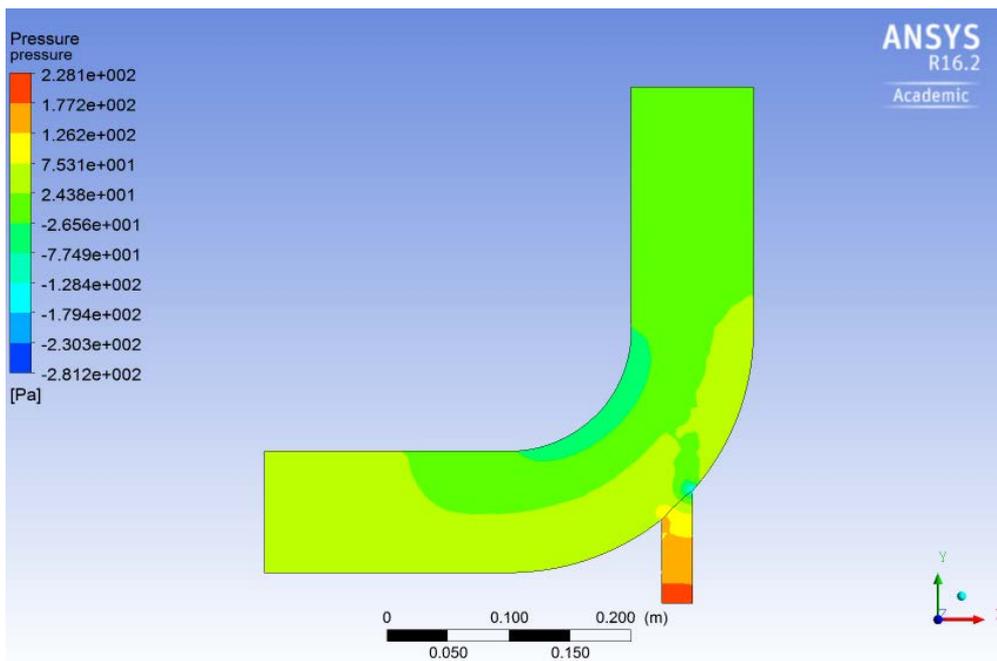


Figura 3.16. Contorno de presión

3.4. Trabajos tutelados para la asignatura Diseño de Instalaciones de Fluidos

En este apartado se desarrollan las dos propuestas de Trabajos tutelados para la asignatura DIF; trabajo tutelado sobre cavitación, y trabajo tutelado sobre transporte de partículas sólidas en aire.

3.4.1. Cavitación

La cavitación es un fenómeno que tiene lugar en ocasiones al acelerar un líquido. Debido al aumento de la velocidad en el flujo se genera una caída de presión (por conservación de la energía mecánica) de manera que esta cae por debajo de la presión de vapor. Cuando esto ocurre, tiene lugar una vaporización local del fluido generándose burbujas de vapor en el interior del flujo. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión donde implosionan reduciendo la velocidad y aumentando la presión. La implosión causa ondas de choque que pueden provocar daños de consideración en los sistemas y dispositivos.

La cavitación puede ser un gran inconveniente, ya que los daños que provoca, a lo largo del tiempo, pueden adquirir dimensiones considerables y suponer la necesidad de cambios o reparaciones de los materiales. Además de los daños físicos, la cavitación puede provocar otros efectos indeseables, como ruidos y vibraciones en las tuberías y equipos.

Para el tipo particular de un fluido incompresible que fluye a través de un tubo que se estrecha y a continuación se ensancha (tobera convergente – divergente) el riesgo de cavitación se encuentra en la garganta, ya que posee el área mínima y la velocidad máxima, con el punto de menor presión a lo largo del dispositivo. Cuando ocurre la cavitación, se generan burbujas localmente, que son arrastradas aguas abajo de la garganta. Cuando estas burbujas llegan a la zona de presión elevada, pueden colapsar generando picos de presión local con el riesgo potencial de dañar la pared de la tobera.

Este trabajo tutelado puede orientarse con diferentes geometrías. En este caso se ha optado por realizar el análisis de un tubo con un estrechamiento brusco, a partir del cual puede ocurrir la cavitación. En la Figura 3.17 se muestra la geometría simulada.

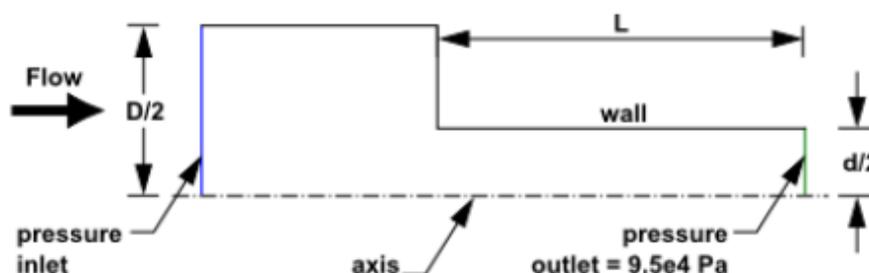


Figura 3.17. Esquema de la contracción brusca evaluada

Los parámetros geométricos utilizados en la simulación son $d = 4 \text{ mm}$, $\frac{L}{d} = 4$ y por último, $\frac{D}{d} = 2.88$.

Se llevan a cabo una serie de simulaciones variando la presión de entrada y comprobando cómo influye este parámetro en el fenómeno de cavitación. A modo de ejemplo, en este apartado se analizarán los resultados obtenidos en dos simulaciones donde se ha modificado la presión de entrada del fluido y por tanto su velocidad, según la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Presiones a la entrada del tubo con estrechamiento brusco

| | Presión en la entrada absoluta (Pa) |
|--------|-------------------------------------|
| Caso 1 | 500000 |
| Caso 2 | 300000 |
| Caso 3 | 200000 |

Los contornos de velocidades obtenidos para los casos analizados, según la Tabla 3.1, se muestran en las figuras 3.18 a 3.20.

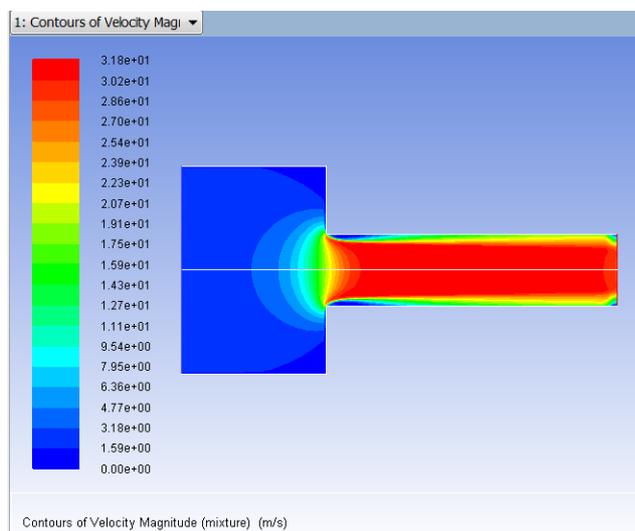


Figura 3.18. Contorno de velocidad Caso 1

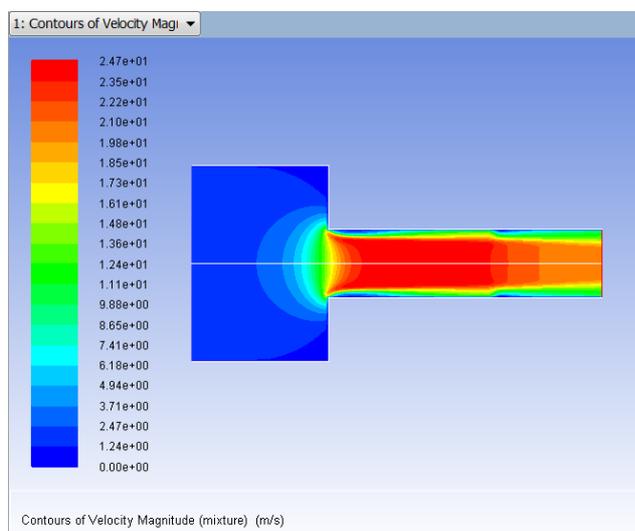


Figura 3.19. Contorno de velocidad Caso 2

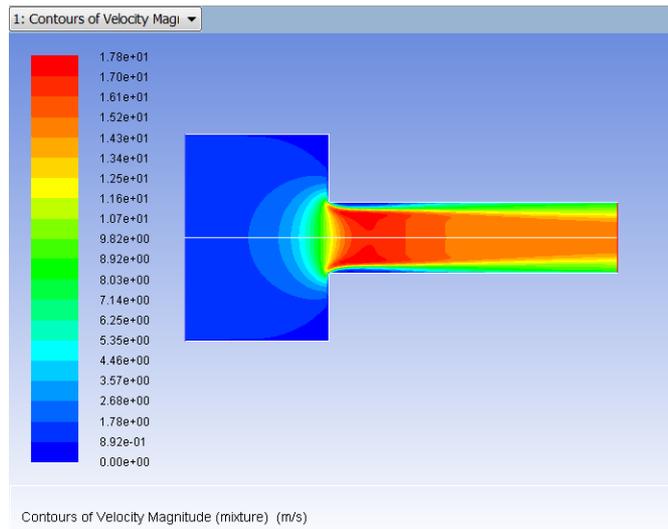


Figura 3.20. Contorno de velocidad Caso 3

Los contornos de presiones se muestran en las figuras 3.21 a 3.23.

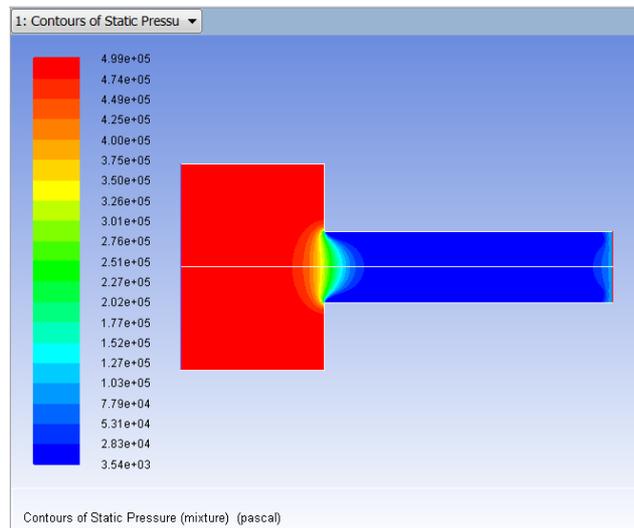


Figura 3.21. Contorno de presión Caso 1

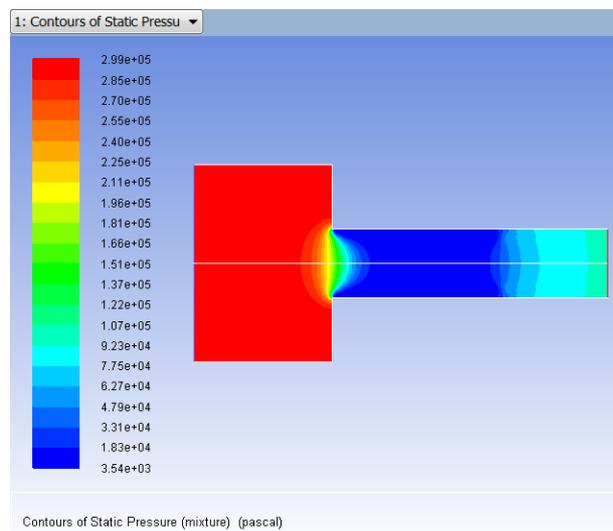


Figura 3.22. Contorno de presión Caso 2

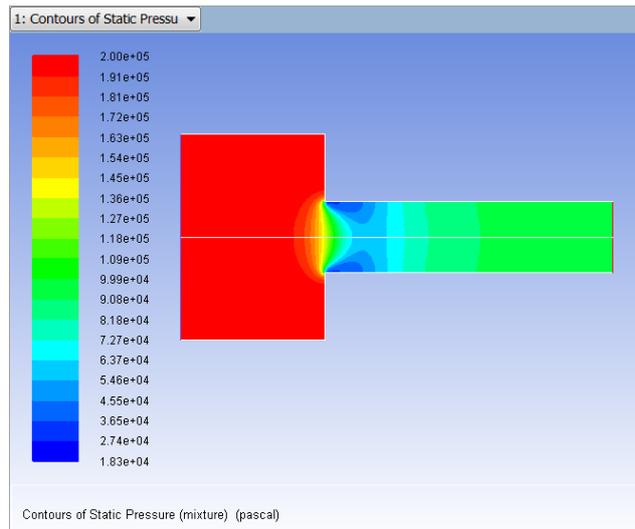


Figura 3.23. Contorno de presión Caso 3

Los contornos de fracción volumétrica de vapor (identificación de fases) para los casos estudiados se muestran en las figuras 3.24 a 3.26.

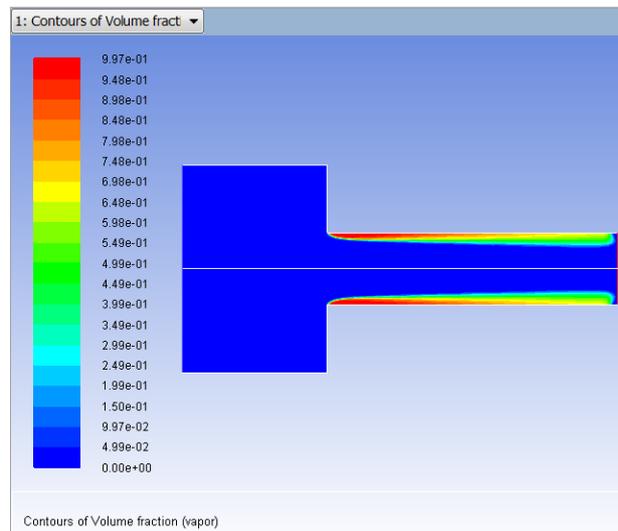


Figura 3.24. Contorno de fracción volumétrica de vapor Caso 1

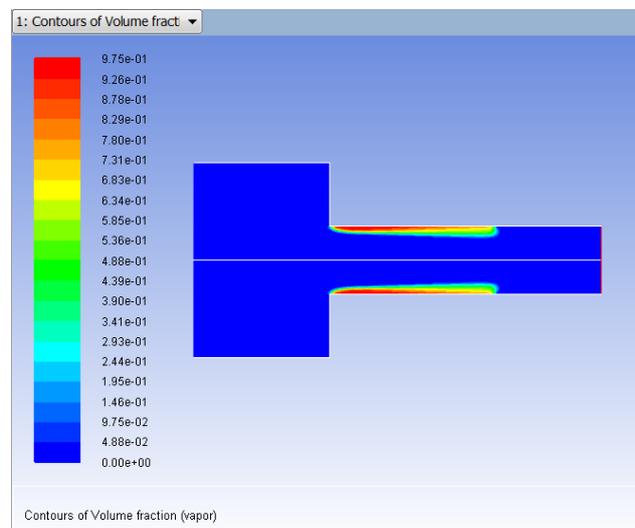


Figura 3.25. Contorno de fracción volumétrica de vapor Caso 2

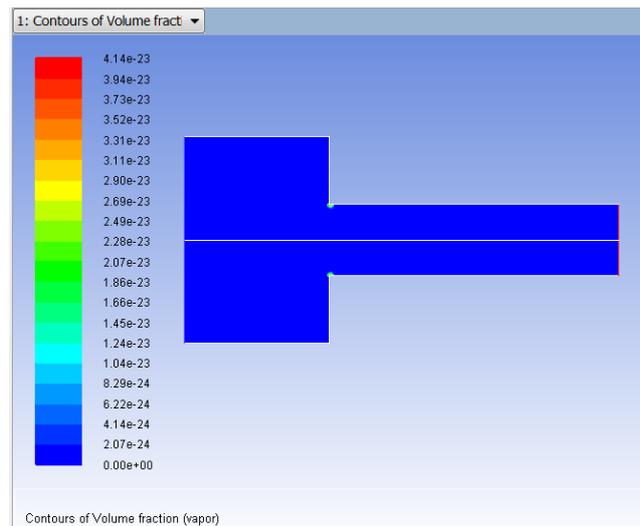


Figura 3.26. Contorno de fracción volumétrica de vapor Caso 3

Para la misma relación de diámetros, variando la presión de entrada se puede observar que, al aumentar la presión en la entrada, aumenta la velocidad y disminuye la presión después de estrechamiento, siendo la zona de baja presión mayor cuanto mayor es la presión de entrada, lo que favorece la formación de vapor.

Observando las figuras 3.24 a 3.26, se concluye que cuanto mayor es la presión en la entrada de un estrechamiento brusco, mayor es la zona donde existe presencia de vapor, siempre que se logre disminuir la presión por debajo de la de saturación.

3.4.2. Flujo de aire con partículas sólidas

Hoy en día el transporte neumático en fase densa es muy utilizado para transportar productos en polvo o granulados en industrias cerámicas, acerías, químicas, procesos de combustión, etc. Por lo tanto, resulta interesante el estudio de este proceso con el objetivo de mejorar su eficiencia.

Este trabajo tutelado puede orientarse con diferentes geometrías. Como un ejemplo de este trabajo tutelado se estudia el caso de una tubería vertical con un flujo ascendente de aire, con un inyector lateral por el que se introducen partículas de antracita y se procede a observar cómo afectan las partículas sólidas a algunos parámetros del flujo.

Los parámetros a modificar son la inclinación de la tubería, el límite de residuos que establece la precisión de los cálculos y la velocidad de entrada del aire (para este estudio se han considerado 1.1, 5, 10 m/s). Las gráficas a analizar son los contornos de densidad, de presión, de velocidad de las partículas sólidas, y las líneas de corriente.

Se realizan un total de cinco simulaciones, partiendo de un caso base (caso 1) con el que se compara el resto. Los parámetros utilizados en cada caso se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros empleados en los distintos casos simulados

| | inclinación [°] | limite de residuos | Vaire [m/s] |
|--------|-----------------|--------------------|-------------|
| Caso 1 | 90 | e^{-3} | 1.1 |
| Caso 2 | 45 | e^{-3} | 1.1 |
| Caso 3 | 90 | e^{-5} | 1.1 |
| Caso 4 | 90 | e^{-3} | 5 |
| Caso 5 | 90 | e^{-3} | 10 |

El Caso 1 se toma como referencia de manera que el comportamiento del flujo y las partículas en el resto de casos es comparado con este.

Los resultados de las simulaciones realizadas, según la Tabla 3.2, se muestran a continuación.

Caso 1

En este caso se ha considerado la tubería vertical con una velocidad del aire ascendente de 1.1 m/s y el límite de residuos para convergencia se ha fijado en 10^{-3} .

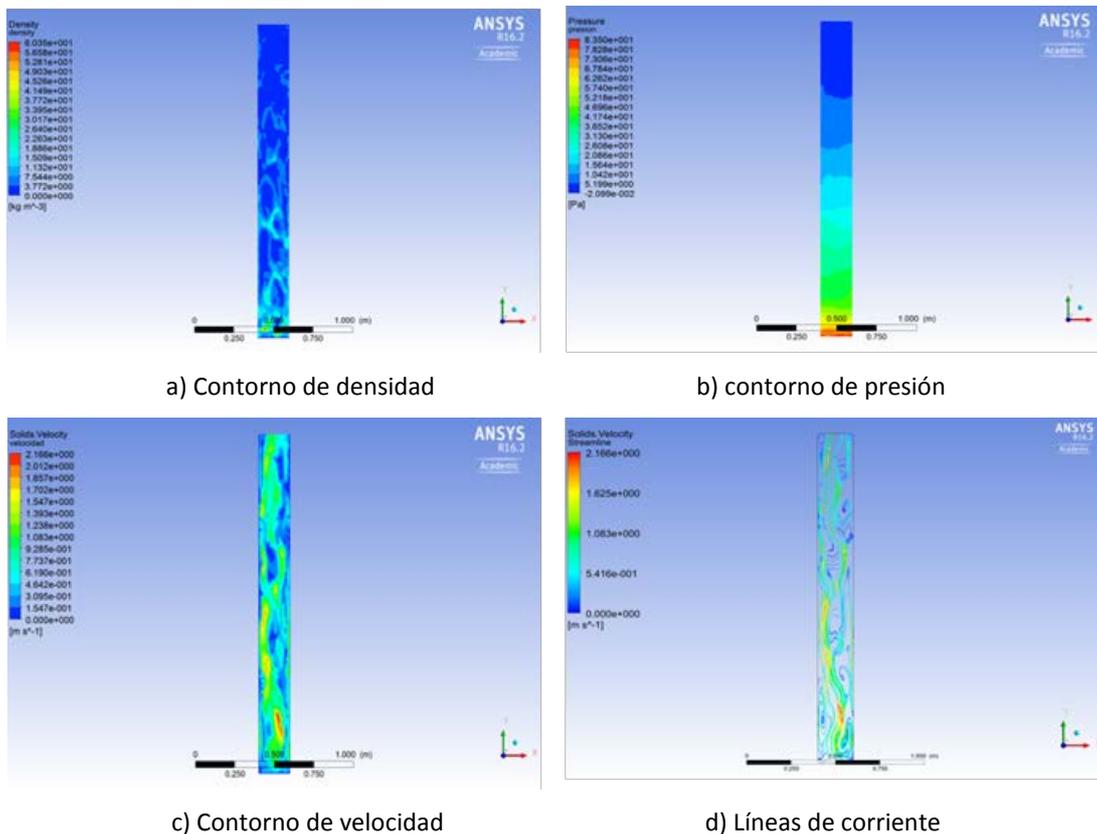


Figura 3.27. Caso 1, caso de referencia

Caso 2

En este caso se ha considerado la tubería inclinada a 45° con respecto a la vertical, con una velocidad del aire ascendente de 1.1 m/s y el límite de residuos para convergencia se ha fijado en 10^{-3} . Para realizar este modelo se puede modificar la geometría inicial pero resulta mucho más rápido modificar la dirección de la gravedad,

introduciendo el valor 6.94 m/s^2 para la dirección x (dirección axial) y -6.94 m/s^2 para la dirección y (dirección radial), lo que equivale a rotar la tubería 45° hacia la derecha.

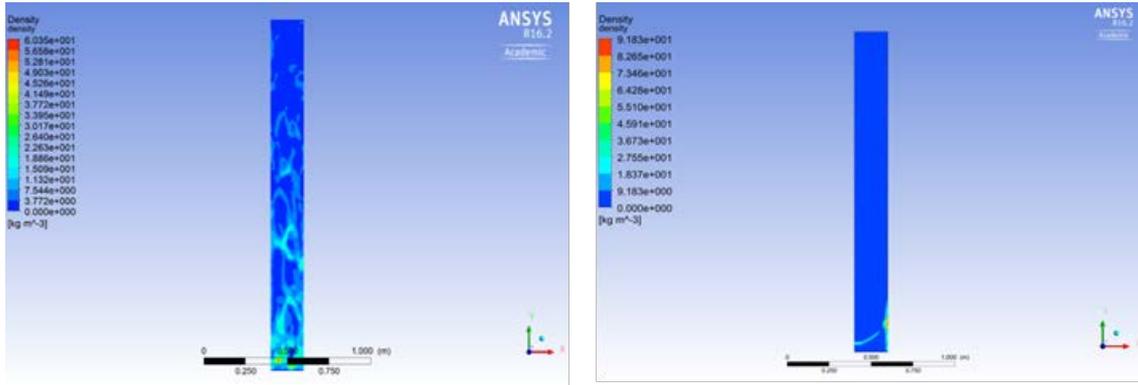


Figura 3.28. Contornos de densidad Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha)

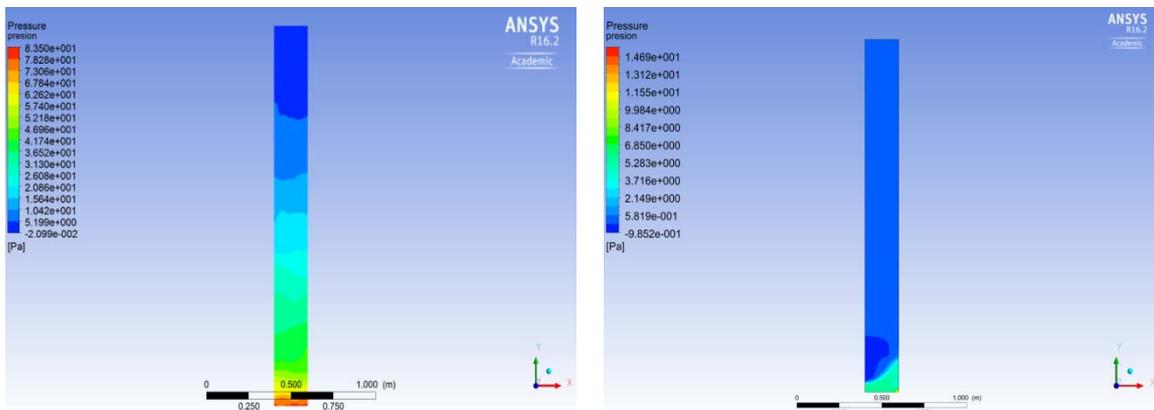


Figura 3.29. Contornos de presión Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha)

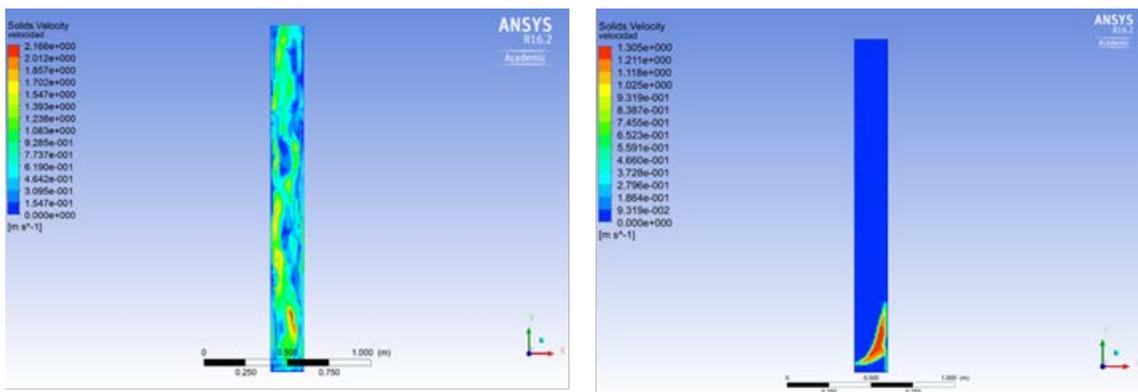


Figura 3.30. Contornos de velocidad Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha)

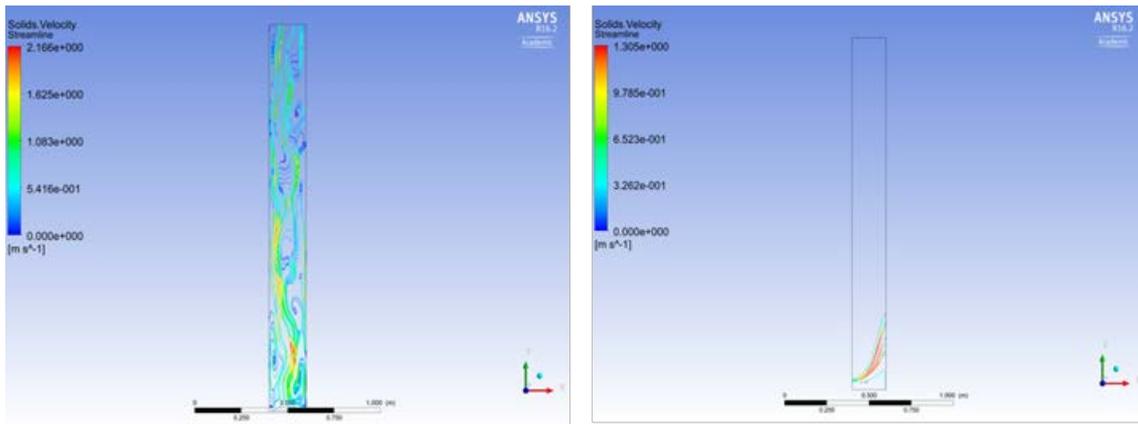


Figura 3.31. Líneas de corriente Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha)

Al inclinar la tubería, las partículas más gruesas caen por su propio peso, el flujo de aire es incapaz de arrastrar las partículas por lo que las mismas chocan con el lado opuesto de la pared donde se depositan y quedan acumuladas al inicio de la tubería. Esto supone una presión elevada en la zona de entrada, que rápidamente es disipada aguas abajo por la baja concentración de partículas en el resto de la tubería.

Caso 3

En este caso se ha considerado la tubería vertical, con una velocidad del aire ascendente de 1.1 m/s y el límite de residuos para convergencia se ha fijado en 10^{-5} .

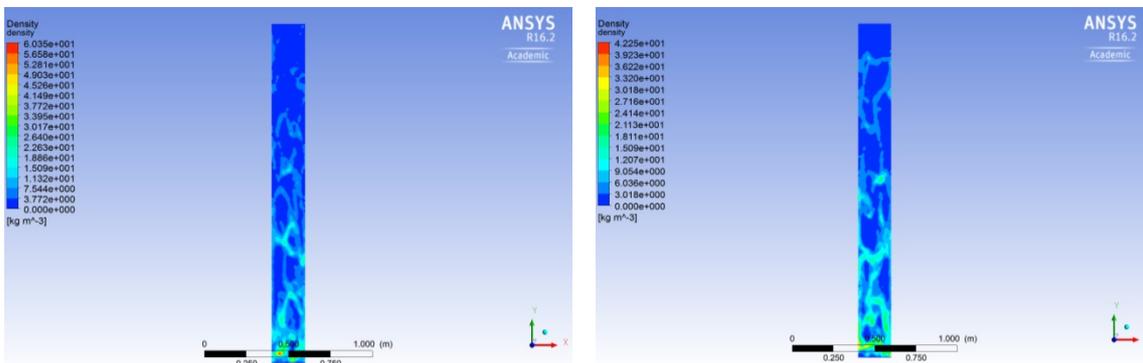


Figura 3.32. Contornos de densidad Caso 1 (izquierda) y Caso 3 (derecha)

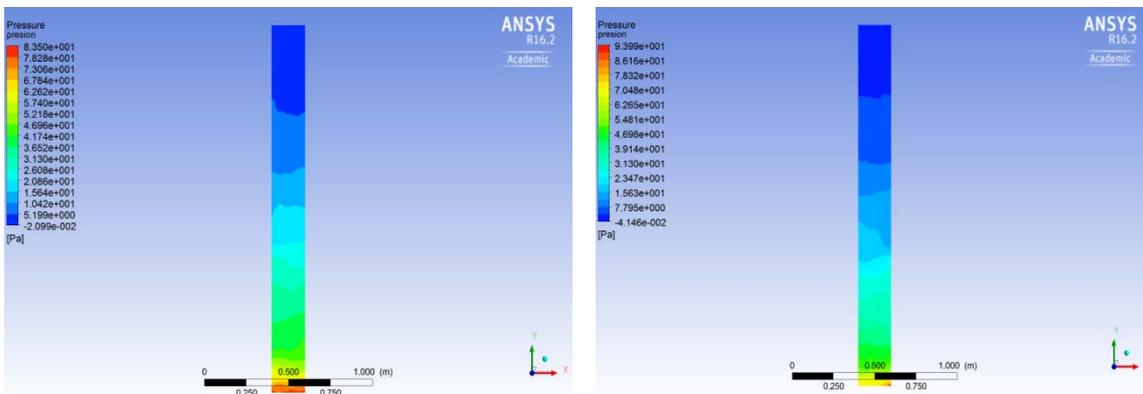


Figura 3.33. Contornos de presión Caso 1 (izquierda) y Caso 3 (derecha)

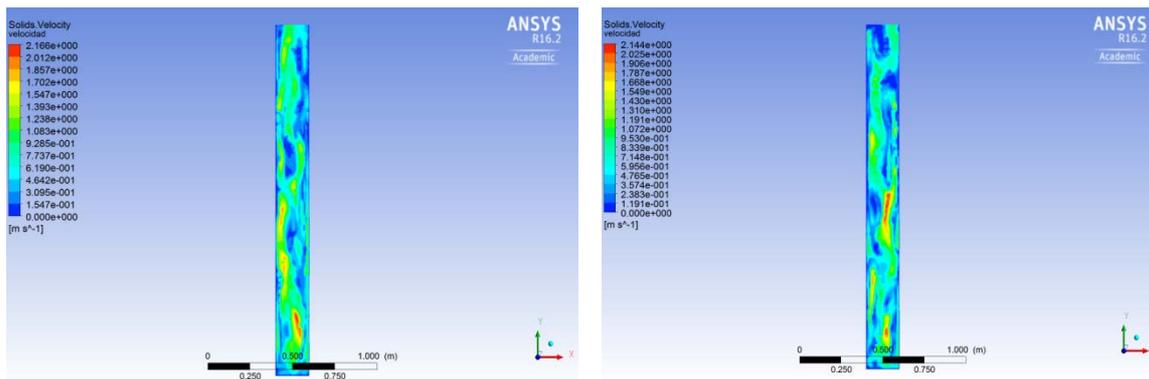


Figura 3.34. Contornos de velocidad Caso 1 (izquierda) y Caso 3 (derecha)

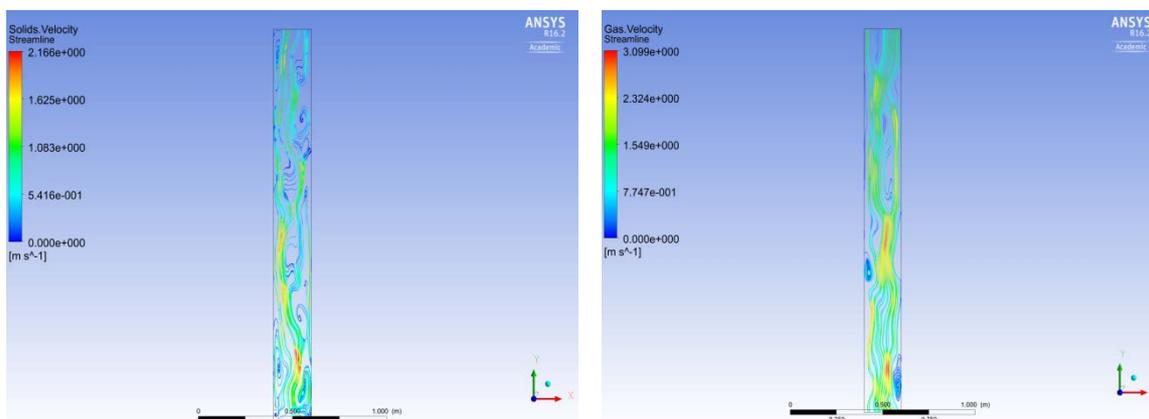


Figura 3.35. Líneas de corriente Caso 1 (izquierda) y Caso 3 (derecha)

Al disminuir el límite de residuos se puede apreciar como el ajuste de las distintas gráficas varía de un caso a otro, siendo las imágenes correspondientes al Caso 3 las que proporcionan una información más precisa, representando mejor el resultado real. Posteriores reducciones del límite de residuos no ocasionan cambios apreciables en los resultados obtenidos.

Casos 4 y 5

A continuación se comparan los casos 4 y 5, en los que se ha variado la velocidad de 5 a 10 m/s en una tubería vertical.

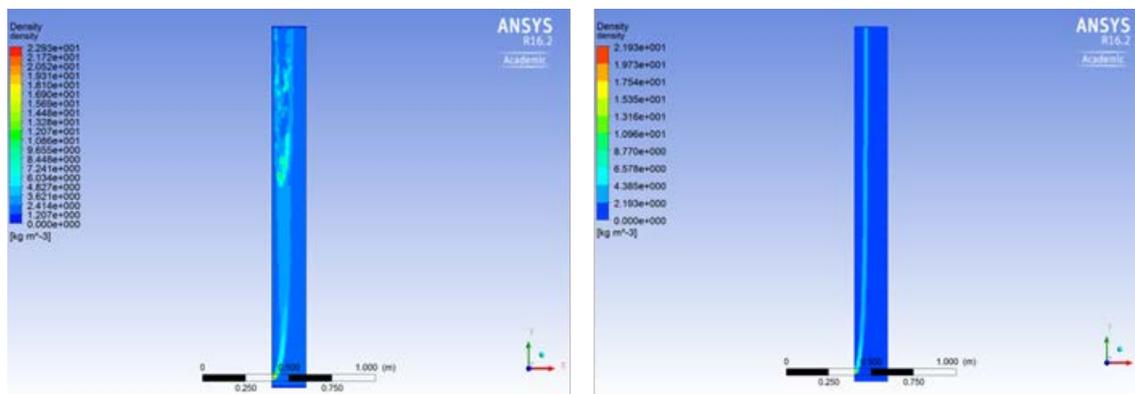


Figura 3.36. Contornos de densidad Caso 4 (izquierda) y Caso 5 (derecha)

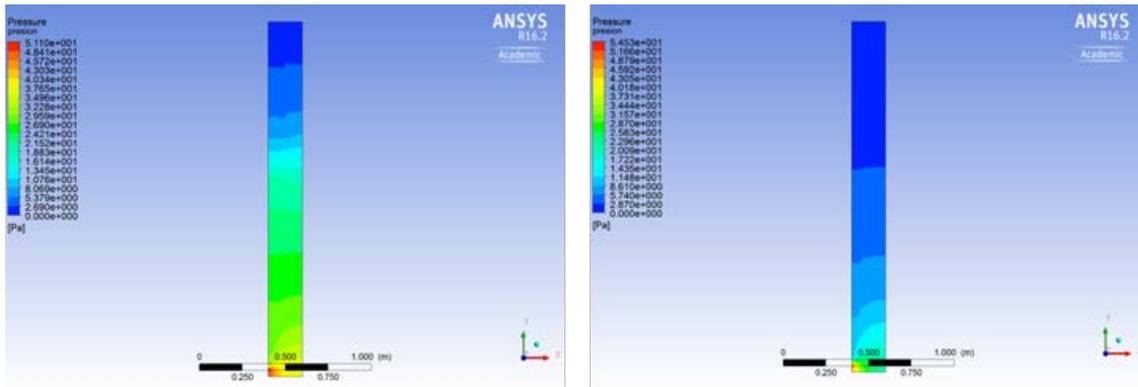


Figura 3.37. Contornos de presión Caso 4 (izquierda) y Caso 5 (derecha)

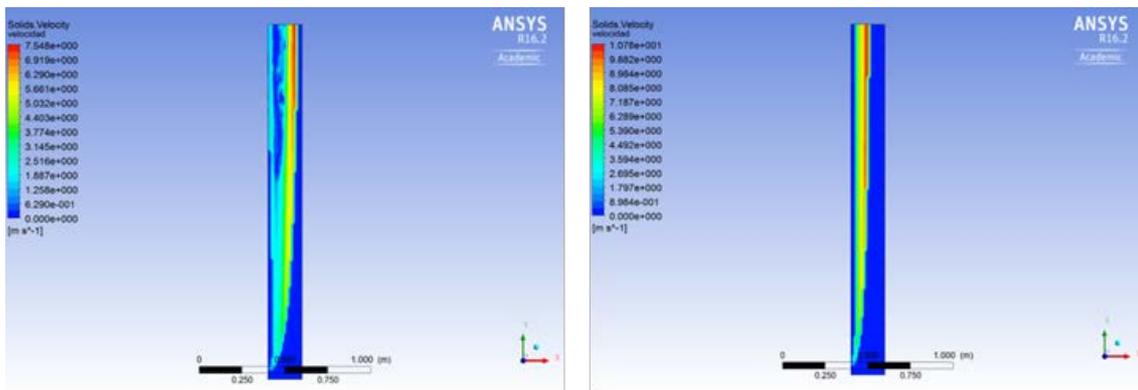


Figura 3.38. Contornos de velocidad Caso 4 (izquierda) y Caso 5 (derecha)

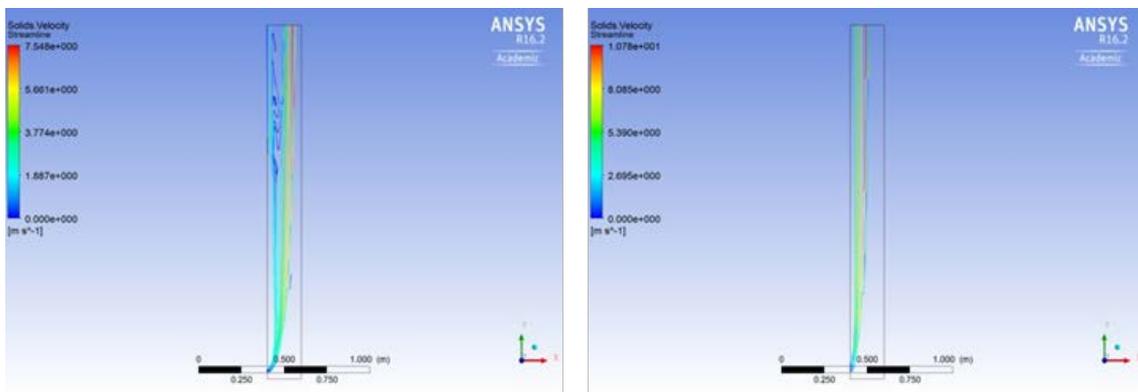


Figura 3.39. Líneas de corriente Caso 4 (izquierda) y Caso 5 (derecha)

Para la velocidad del aire de 5 m/s se puede apreciar que el gas es capaz de arrastrar las partículas hasta unos dos tercios del tubo, a partir de ahí, el aire ya no puede arrastrar de forma tan eficiente las partículas y comienzan a aparecer zonas de mayor concentración de partículas. Esto es debido a que el desprendimiento de la capa límite aguas abajo de la inyección de partículas (pared izquierda), genera una región de baja velocidad incapaz de arrastrar a las partículas. Sin embargo, al aumentar más la velocidad hasta 10 m/s el arrastre es completo concentrando las partículas en una sola y estrecha región más cerca de la parte izquierda del tubo, debido a que por esta pared se introducen las partículas.

4. Proceso de mezcla en un atomizador de fluido auxiliar

La atomización juega un papel importante en la eficiencia de la combustión. En los últimos años se han realizado varias investigaciones para mejorar la comprensión de los mecanismos de atomización y mezclado, analizando sus capacidades y limitaciones.

Como ya se comentó previamente, uno de los objetivos del presente proyecto es mejorar la simulación CFD del proceso de mezcla en un atomizador con fluido auxiliar realizada por Ferreira en 2010 [13], la cual no pudo finalizarse debido a la imposibilidad de reducir los residuos de manera satisfactoria.

En las simulaciones que se desarrollan a continuación se simula el proceso de mezcla de agua con aire en una boquilla de atomización.

4.1. Geometría

La geometría de partida consiste en la boquilla de un atomizador de mezcla con fluido auxiliar, compuesta por dos piezas independientes que en su unión conforman una cámara de mezcla interna. Los fluidos se introducen por dos entradas: la zona central por la que se introduce el aire y el anillo exterior por el que entra el agua a la cámara de mezcla a través de seis conductos. La mezcla sale por ocho orificios en forma de espray.

La geometría del cuerpo metálico se importa directamente al programa como un documento CAD (ver Figura 4.1), posteriormente se modifica la misma para obtener el dominio fluido que realmente se requiere en el estudio.

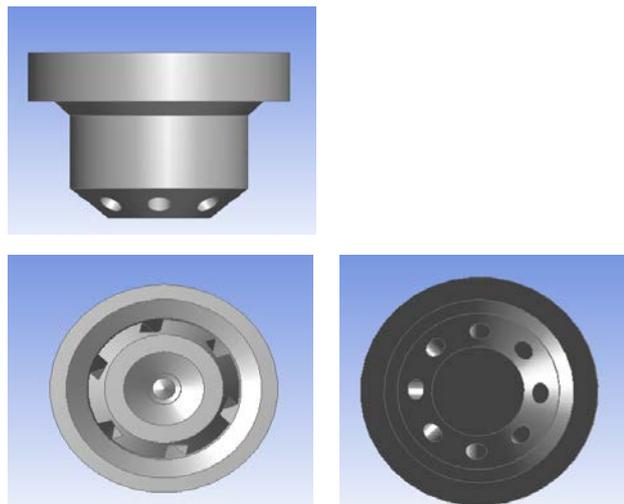


Figura 4.1. Geometría de la boquilla

4.2. Extracción de fluido

En el presente trabajo se analiza el comportamiento del flujo multifásico en el interior de la cámara de mezcla, es decir, se pretende analizar el proceso de mezcla de los fluidos cuando fluyen a través de la boquilla. Para poder realizar este análisis la geometría que se necesita no es la boquilla en sí, sino el fluido que circula por su interior, con un volumen de control que se corresponde con las partes huecas que existen en el interior de las dos piezas que conforman el atomizador.

Para lograr extraer la parte fluida de un dispositivo metálico, el software de Diseño de Geometría de ANSYS dispone de una herramienta denominada **fill** que permite mediante dos métodos diferentes la extracción de estas zonas huecas. El primer método, **by cavity**, consiste en seleccionar todas las paredes en contacto con el fluido. El segundo método es el **by caps**, que es el que se ha seguido en este proyecto. En este método en primer lugar se deben crear unas superficies de cierre en las entradas y salidas de la boquilla. Las superficies de cierre creadas pueden apreciarse en la Figura 4.2, donde las caras en color verde se corresponden a la entrada de agua y la salida de la mezcla y la cara azul con la entrada de aire.

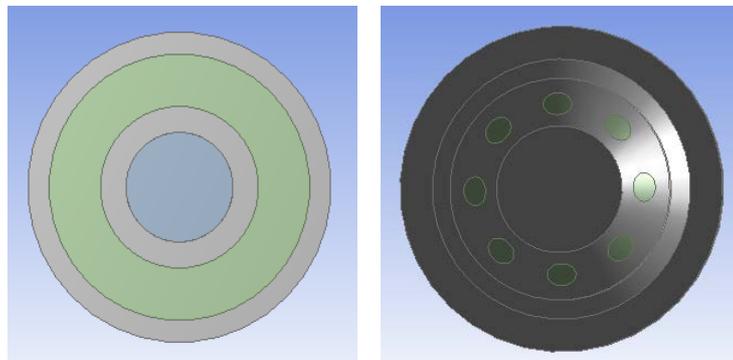


Figura 4.2. Tapas para la extracción del fluido

Una vez creadas las superficies de cierre del volumen hueco, se rellena el mismo hasta todas las paredes, sin permitir que este nuevo volumen se mezcle con el cuerpo metálico de la boquilla. Tras disponer del volumen fluido interior a la boquilla se eliminan las dos piezas sólidas (metálicas) que componen la boquilla, obteniéndose el cuerpo fluido que es el dominio de estudio. En la Figura 4.3 se puede apreciar el dominio fluido de la boquilla, con su entrada de agua (anillo exterior en la imagen derecha de la figura), entrada de aire (superficie circular interior en la imagen derecha de la figura) y salida de mezcla (cilindros en la parte inferior de la imagen izquierda de la figura).

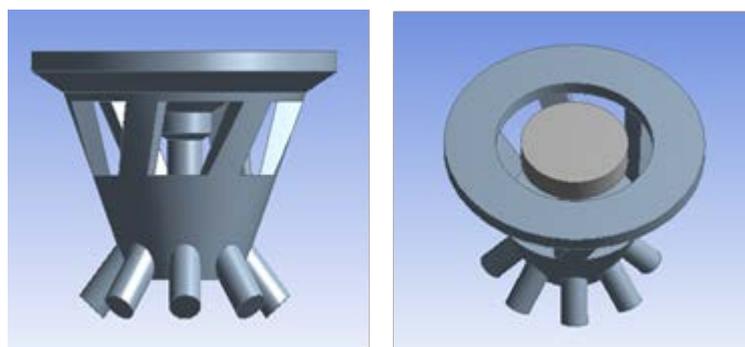


Figura 4.3. Geometría del dominio de flujo

4.3. Mallado

Para realizar las simulaciones con un software de dinámica de fluidos computacional (CFD), es necesario mallar la zona de estudio. Las características de este mallado repercuten en la calidad de los resultados obtenidos en las simulaciones.

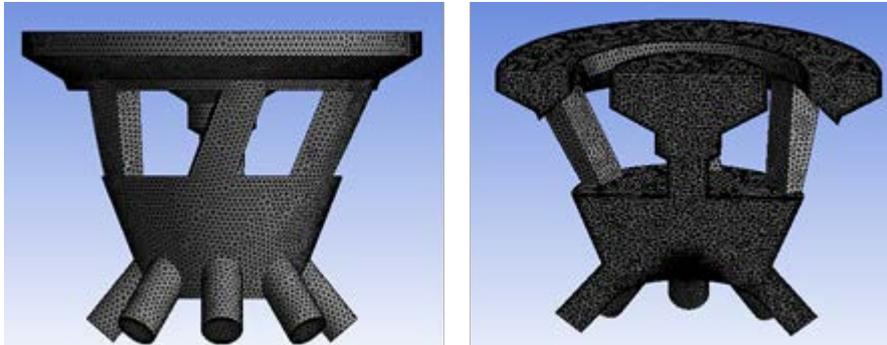


Figura 4.4. Mallado de la geometría

Se ha realizado un mallado triangular del volumen con un tamaño medio de los elementos de 5×10^{-4} m, obteniéndose 190261 nodos y 632311 elementos. El comportamiento de la malla es suave. En las zonas cercanas a las paredes se ha realizado un mallado más fino lo que proporcionará una mayor resolución de cálculo en la capa límite.

Por último se designan las partes de la geometría: ambas entradas (air-inlet y water-inlet), la salida (outlet) y el cuerpo en su conjunto (fluid).

4.4. Configuración incompresible. Modelos

Para simplificar, en un primer análisis se considera que el flujo de aire se comporta como un flujo incompresible, lo cual es estrictamente cierto para bajas velocidades del aire. En este apartado se especifican las ecuaciones y las condiciones de contorno para este caso. Para facilitar la convergencia de la simulación, al dominio fluido descrito en el apartado anterior se le adiciona un cilindro en la zona de salida de la mezcla del atomizador con el objetivo de alejar la salida de presión atmosférica (**pressure outlet**) del dominio analizado.

Esta simulación será de tipo basada en la presión, con una formulación de velocidad absoluta, estacionaria en el tiempo y sin considerar la gravedad.

Los modelos seleccionados son el **Standard k- ϵ** para la viscosidad con un tratamiento mejorado próximo a las paredes, y el **mixture** para el flujo multifásico.

Tras seleccionar los modelos, es importante definir las propiedades de los fluidos. En este caso se seleccionan el agua líquida y el aire de la base de datos de ANSYS, ambos con propiedades constantes (consideración de incompresibilidad para el aire). Una vez guardados estos fluidos se determinan las fases que componen el flujo bifásico. En este caso para flujo incompresible, se define el agua como fase primaria y el aire como fase secundaria.

Por último, se introducen las velocidades del agua y el aire en sus respectivas entradas, así como, para la mezcla una salida de presión a presión atmosférica, es decir, a presión manométrica nula.

En estas simulaciones se estudia cómo afectan las velocidades de entrada al proceso de mezclado.

4.5. Configuración incompresible. Resultados

En este ejercicio se ha considerado que la mezcla agua-aire que sale por los orificios de la boquilla va a parar a un cilindro. Este cuerpo se introduce para alejar la condición de contorno **pressure-outlet** (con valor de presión atmosférica), logrando que la misma no esté situada inmediatamente después de la salida de la boquilla y facilitando la convergencia. Este cilindro adicional posee un diámetro suficientemente grande para evitar que sus paredes puedan distorsionar la solución. Se debe puntualizar que, aunque en las figuras obtenidas se puedan observar valores y tendencias en dicha zona adicional, éstos no se corresponden con una simulación real de atomización, ya que no se ha incluido en la simulación ningún modelo de rompimiento de gotas. Para lograr describir el proceso de atomización se debe realizar un nuevo ejercicio, tomando los datos de una de las salidas de la boquilla como entrada a otro dominio fluido y configurar en este nuevo problema un modelo de rompimiento de gotas. Esta parte no se ha desarrollado en este trabajo, además de por su complejidad, debido a que el objeto de este estudio es el análisis del interior de la cámara de mezcla y el proceso de mezclado. En trabajos futuros se pretende intentar simular el proceso de atomización.

En los numerosos casos simulados, se probaron diferentes configuraciones del cilindro. Por un lado se consideró que la boquilla y el cilindro podían considerarse como un único dominio, pero también se consideró la opción de separar la geometría en dos grupos independientes, la propia boquilla y el cilindro adicional. Por otra parte, se consideraron las opciones de establecer como **pressure-outlet** las tres fronteras del cilindro (las dos caras circulares y la pared lateral), o solo una salida de la mezcla agua-aire por la pared cilíndrica inferior del cilindro. Al analizar los resultados obtenidos para unas mismas condiciones de velocidad de entrada del agua y del aire no se apreciaron diferencias significativas entre estas variantes de estudio, de manera que se concluyó que estas modificaciones en las condiciones de contorno en las fronteras del cilindro adicional tienen poca influencia en el proceso de mezcla estudiado. Seguramente este resultado se debe a que las dimensiones del cilindro adicional garantizan que sus fronteras estén lo suficientemente alejadas del dominio de análisis, como para que su influencia sea despreciable.

En esta memoria se incluyen solamente cuatro de los múltiples casos evaluados, donde se ha variado la velocidad de entrada del agua, manteniendo la velocidad de aire igual a 20 m/s. De cada caso se han obtenido las gráficas de los contornos de densidad y presión entre otros.

En la Tabla 4.1 se muestran las velocidades de los fluidos en los diferentes casos.

Tabla 4.1. Casos analizados con flujo incompresible.

| | Vaire (m/s) | Vagua (m/s) |
|--------|-------------|-------------|
| Caso 1 | 20 | 1 |
| Caso 2 | 20 | 0.90 |
| Caso 3 | 20 | 0.79 |
| Caso 4 | 20 | 0.70 |

Densidad

En la Figura 4.5 se muestran los contornos de densidad para los casos analizados.

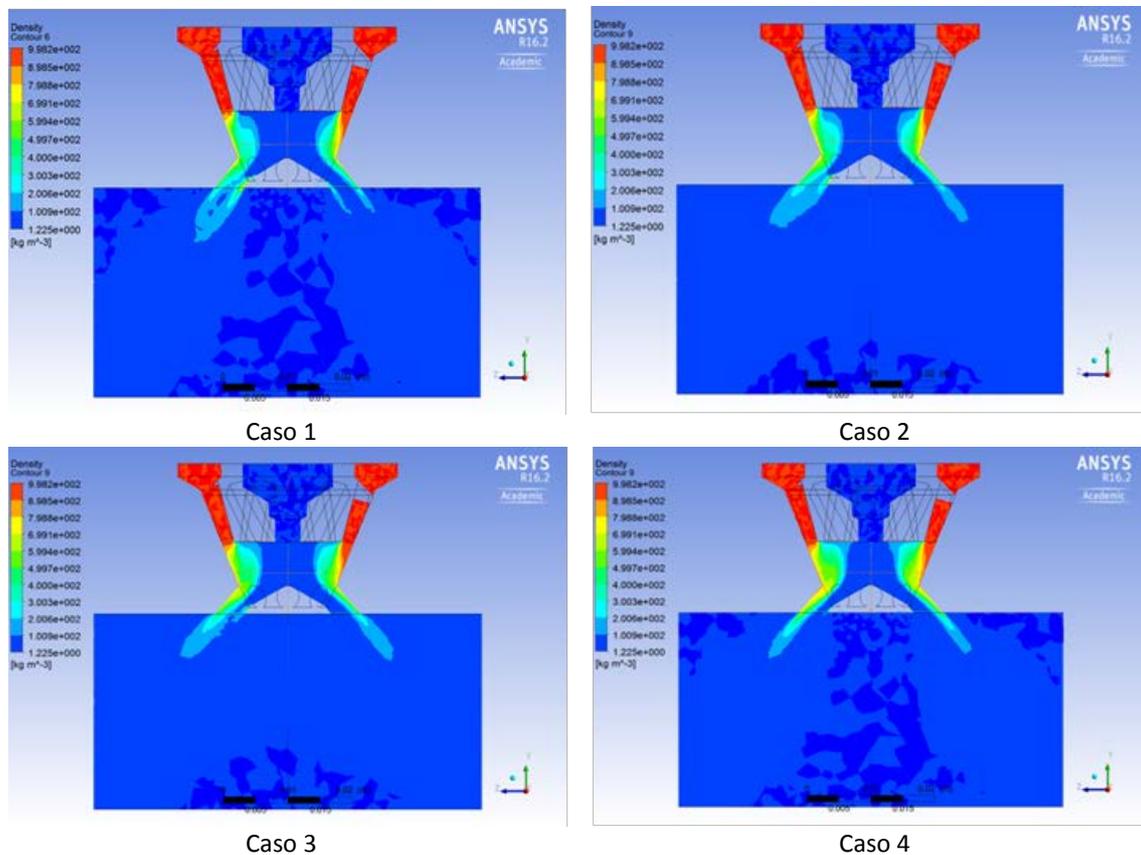


Figura 4.5. Contornos de densidad

Como puede apreciarse comparando los casos de la Figura 4.5, al disminuir la velocidad del agua a la entrada, se produce una mejor mezcla en la cámara. Se puede observar que en los casos 3 y 4 una mayor zona con una densidad intermedia, lo que se corresponde con la zona de mezclado agua-aire.

Presión

En la Figura 4.6 se muestran los contornos de presión para los casos analizados.

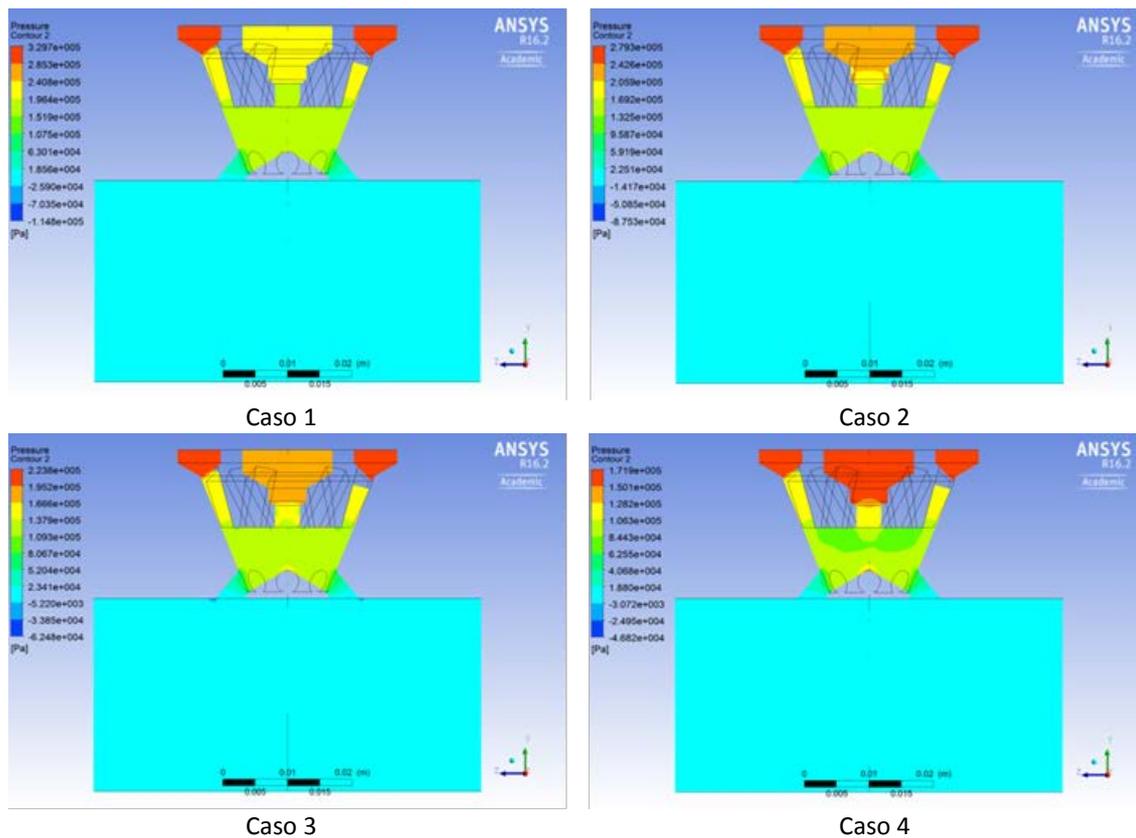


Figura 4.6. Contornos de presión

En estos gráficos no es posible apreciar con suficiente precisión los valores de presión para el agua, el aire y la mezcla, pero el programa permite integrar directamente los valores de las presiones en ambas entradas y en la salida. Los resultados se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Presiones en la boquilla

| | p_{aire} (Pa) | p_{agua} (Pa) | p_{salida} (Pa) |
|--------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| Caso 1 | 233000 | 328000 | -19 |
| Caso 2 | 210000 | 273000 | -45 |
| Caso 3 | 194284 | 222572 | -38 |
| Caso 4 | 169990 | 171000 | -13 |

Como se puede observar en la Tabla 4.2, conforme se reduce la velocidad de entrada del agua, las presiones de entrada disminuyen. Además, se puede apreciar que cuanto menor es esta velocidad (Caso 4) menor es la diferencia de presiones entre la entrada de agua y la del aire.

En todos los casos la presión a la salida de la boquilla es ligeramente menor que la atmosférica de manera que tiene lugar un débil flujo inverso en esa zona. Estos valores de presión distintos de cero, y, en todos los casos inferiores a 50 Pa, podrían considerarse despreciables al describir el funcionamiento de la boquilla (o debidos a errores de ajuste), y por lo tanto, no tener el significado de un ligero flujo inverso en la salida de la boquilla. Se requieren simulaciones con un mallado mucho más fino en la descarga de la boquilla para poder confirmar o desmentir este ligero flujo inverso detectado en estas simulaciones.

4.6. Configuración compresible. Modelos

En realidad el aire se comporta como un flujo compresible para números de Mach mayores de 0.3, de manera que, tras un primer análisis simplificado del atomizador, y comprobando que la velocidad del flujo de aire puede generar números de Mach superiores, se ha procedido a un análisis más realista del proceso de mezclado considerando la compresibilidad del aire.

A continuación se especifican las modificaciones realizadas sobre el caso de flujo de aire incompresible para este análisis. Al trabajar un flujo multifásico con una de las fases compresible, los cálculos a ejecutar por el programa se complican, de manera que la simulación y posterior análisis se centrará únicamente en lo que ocurre en el interior de la boquilla, eliminando el cilindro externo adicionado en el apartado incompresible para facilitar la convergencia.

En primer lugar es necesario activar la ecuación de la energía en los modelos a utilizar. También se deben modificar las fases que componen el flujo multifásico. En este caso con un flujo compresible, se define el aire como fase primaria y el agua como fase secundaria.

La simulación de este caso supone unos cálculos muy complejos y el programa no logra converger en la etapa inicial de iteración. Para prevenir esto, se inician los cálculos con la ecuación de la energía desactivada y se especifica el factor de relajación de la presión en 0.3. Una vez transcurridas alrededor de unas 50 iteraciones se detiene la simulación, se activa la ecuación de la energía, se recupera el factor de relajación de la presión por defecto (0.7) y se continúa corriendo la simulación hasta que los residuos converjan o se alcancen las 3500 iteraciones. Por lo general el proceso de cálculo requiere unas 10 horas corriendo sobre Windows a 64 Bits con un procesador I5, una tarjeta gráfica ASUS GT730, y 16 GB de memoria RAM.

4.7. Configuración compresible. Resultados

En este ejercicio se han simulado seis casos diferentes donde se ha modificado el flujo másico de aire y la velocidad del agua en la entrada.

En la Tabla 4.3 se muestran las características de los casos analizados.

Tabla 4.3. Casos analizados con flujo compresible.

| | $m_{\text{aire}}(\text{Kg/s})$ | $V_{\text{agua}}(\text{m/s})$ |
|--------|--------------------------------|-------------------------------|
| Caso 1 | 0.0037 | 0.797 |
| Caso 2 | 0.004 | 0.7 |
| Caso 3 | 0.008 | 0.9 |
| Caso 4 | 0.008 | 0.7 |
| Caso 5 | 0.008 | 0.6 |
| Caso 6 | 0.008 | 0.5 |

De cada caso se han obtenido las gráficas de los contornos de densidad, número de Mach, energía cinética turbulenta y presión, y los vectores de velocidad para su posterior comparación con el resto de casos.

Densidad

En la Figura 4.7 se muestran los contornos de densidad obtenidos para los diferentes casos simulados.

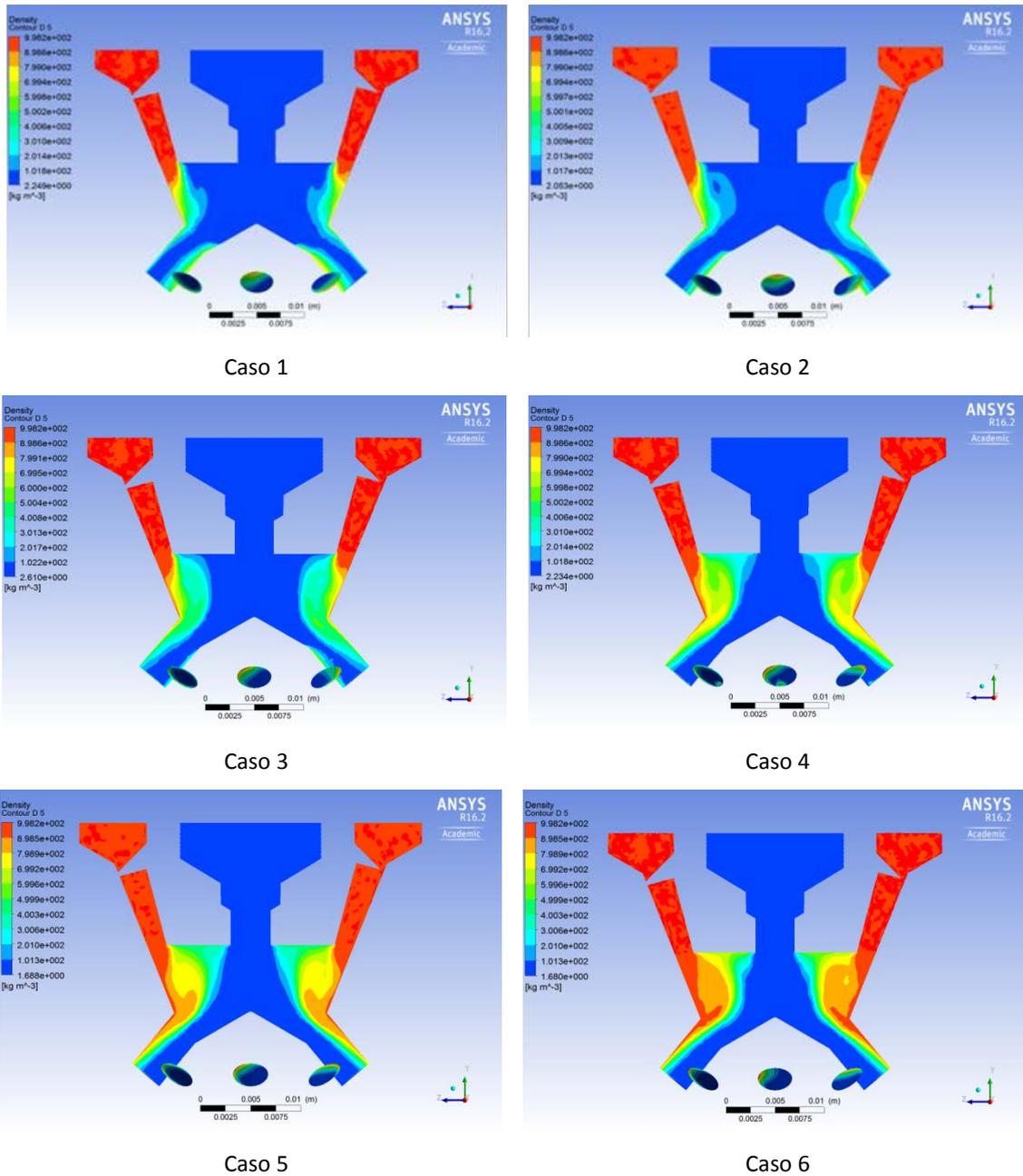


Figura 4.7. Contornos de densidad

Los seis casos estudiados se han analizado considerando el aire como flujo compresible, de manera que los cambios de velocidad producen cambios en la presión, induciendo cambios en la densidad del aire. Estos gráficos no permiten apreciar con claridad las variaciones de densidad, pero, puesto que el programa permite obtener el valor de la velocidad del aire a la entrada de la boquilla y se conoce el área de entrada y el flujo másico en cada caso, la densidad a la entrada puede ser calculada. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Densidad del aire a la entrada de la boquilla

| | $\rho_{\text{aire}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ |
|--------|----------------------------------------------|
| Caso 1 | 3.303 |
| Caso 2 | 3.138 |
| Caso 3 | 5.212 |
| Caso 4 | 4.682 |
| Caso 5 | 4.442 |
| Caso 6 | 4.191 |

Comparando los casos 2 y 4 se observa que, al aumentar el flujo másico de aire, con la velocidad del agua a la entrada constante (igual flujo másico de agua), la densidad del aire aumenta, mientras que esta disminuye al reducir la velocidad de entrada del agua a flujo másico de aire constante (casos 3, 4, 5 y 6).

También se observa que al aumentar el flujo de aire a la entrada, a velocidad del agua a la entrada constante, se produce una mejor mezcla en la cámara, como puede apreciarse comparando los casos 2 y 4 de la Figura 4.7, donde se aprecia para el caso 4 una mayor zona con una densidad intermedia, es decir, una mayor zona de mezcla agua-aire. Por el contrario, al disminuir la velocidad del agua para un flujo de aire fijo, la mezcla empeora. Esto puede observarse estudiando detenidamente los casos 3, 4, 5 y 6 en la Figura 4.7, prestando especial atención, no solo a la amplitud de la zona de mezcla, sino también a la leyenda de concordancia entre colores y valores de densidad, que es diferente para cada caso.

Ma

En la Figura 4.8 se muestran los contornos de número de Mach obtenidos para los diferentes casos simulados.

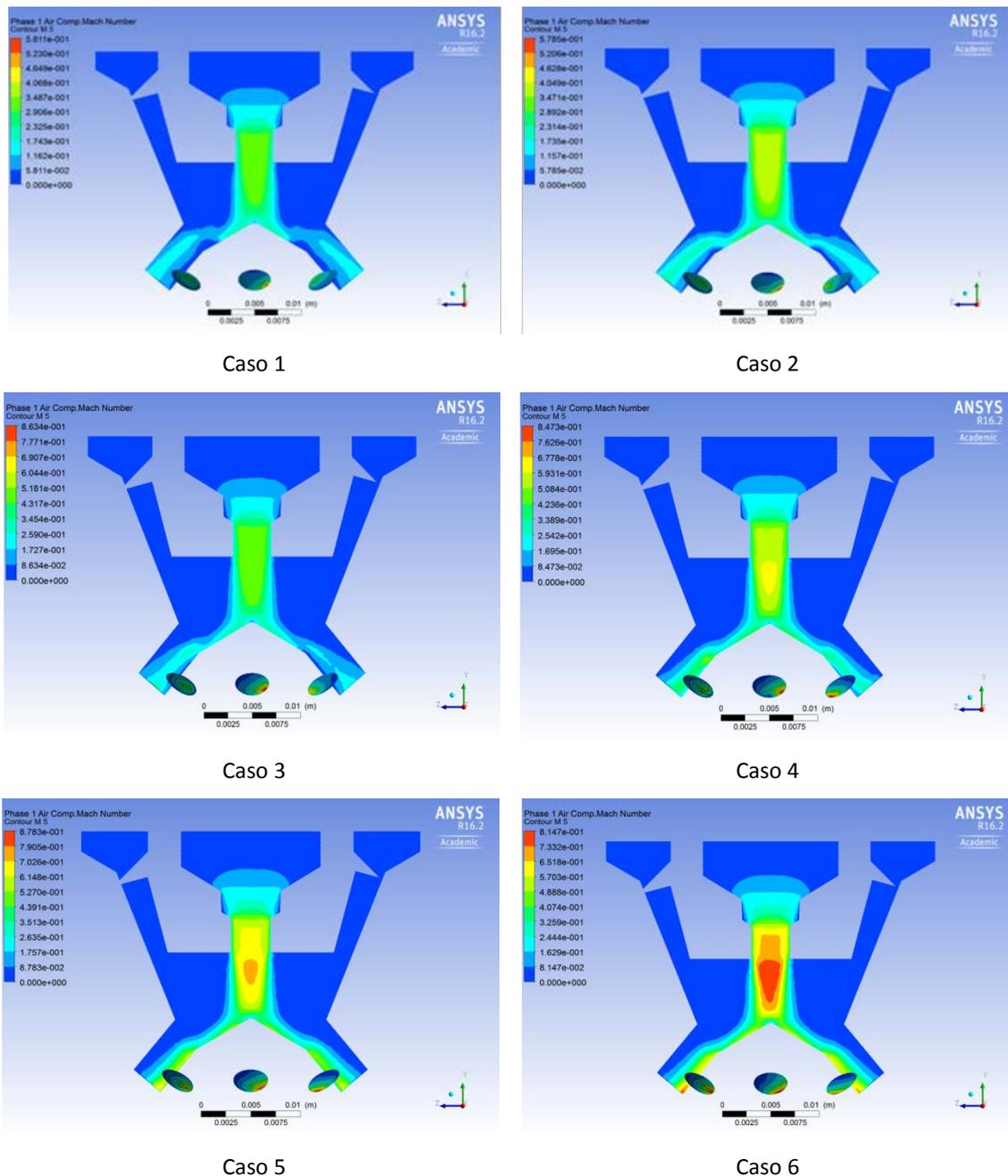


Figura 4.8. Contornos de número de Mach

Cuando el flujo de aire es subsónico a la entrada, al disminuir el área, la velocidad aumenta y la presión disminuye. El número de Mach es el cociente entre la velocidad del aire y la velocidad del sonido en las mismas condiciones, de manera que para el análisis del número de Mach la sección de mayor interés es el conducto de menor sección transversal por el que circula el aire (descarga a la cámara de mezcla), puesto que en esta garganta se alcanza la mayor velocidad del aire, y con ello el mayor número de Mach. En la Figura 4.8, comparando los casos 1, 2 y 4 se puede apreciar que cuanto mayor es el flujo de aire en la entrada, mayor es la velocidad en la entrada a la cámara de mezcla, y por lo tanto mayor es el número de Mach. Por el contrario, observando los casos 3, 4, 5 y 6 se observa que el número de Mach en esta zona es mayor cuanto menor es la velocidad de entrada del agua. Como ya se ha comentado en la Figura 4.7 es importante comparar las figuras atendiendo tanto a los contornos

de colores como a la leyenda que relaciona color con valor del número de Mach, y que difiere de un caso a otro.

Vectores de velocidad

En la Figura 4.9 se muestran los vectores de velocidad obtenidos para los diferentes casos analizados.

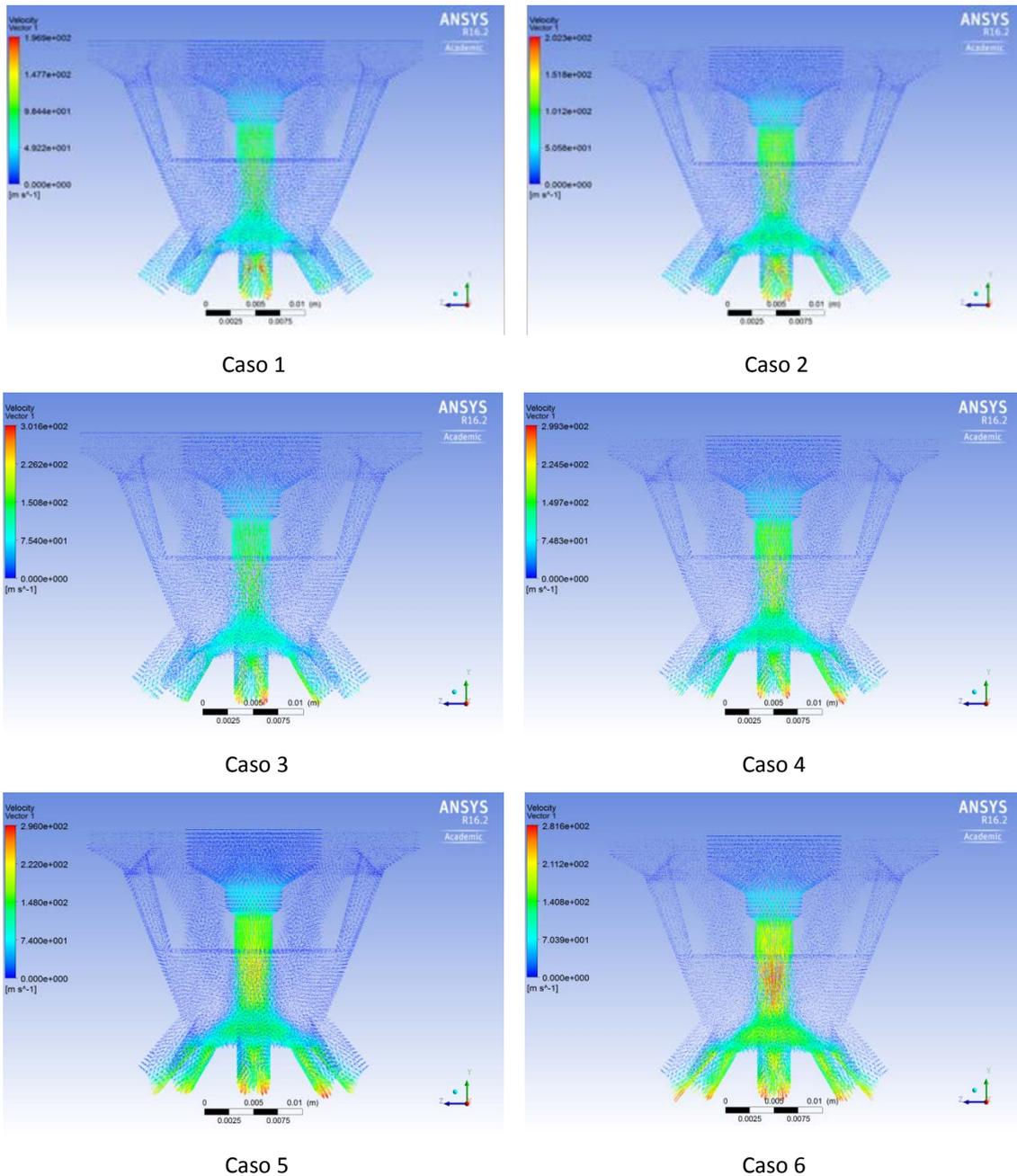


Figura 4.9. Vectores de velocidad

Como se ha comentado previamente, el número de Mach es directamente proporcional a la velocidad del flujo de aire. Comparando los casos de la Figuras 4.9 con los de la 4.8, se puede apreciar que cuanto mayor es el número de Mach y la velocidad del aire a la entrada de la cámara de mezcla, mayor es la zona de recirculación del aire en la cámara.

La afirmación anterior puede no apreciarse suficientemente en los diferentes casos presentados en la Figura 4.9 debido a la reducción de escala a la que se han sometidos las imágenes. De cualquier manera la variación de la energía turbulenta de un caso a otro puede ser un buen indicador para demostrar el incremento de la zona de recirculación del aire en la cámara de mezcla.

Energía cinética turbulenta

En la Figura 4.10 se muestran los contornos de la energía cinética turbulenta obtenidas para los casos 2 y 4, donde se han ajustado las leyendas de colores para que coincidan en ambos casos.

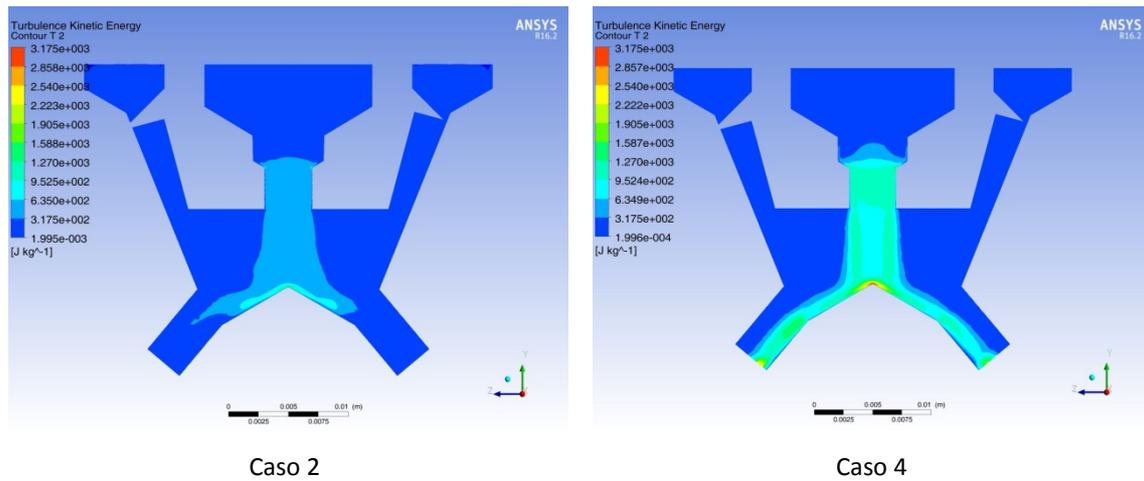


Figura 4.10. Contornos de energía cinética turbulenta para los Casos 2 y 4

Al incrementar el flujo de aire a la entrada (Caso 4), la energía cinética turbulenta aumenta, y, por lo tanto, la zona de mezclado y el propio proceso de mezcla se ven favorecidos con respecto al caso 2. Esto puede comprobarse en la Figura 4.7, donde, como ya se ha comentado anteriormente, un mayor flujo de aire supone una mejor mezcla en la cámara.

Presión

En la Figura 4.11 se muestran los contornos de presión obtenidos para los diferentes casos analizados.

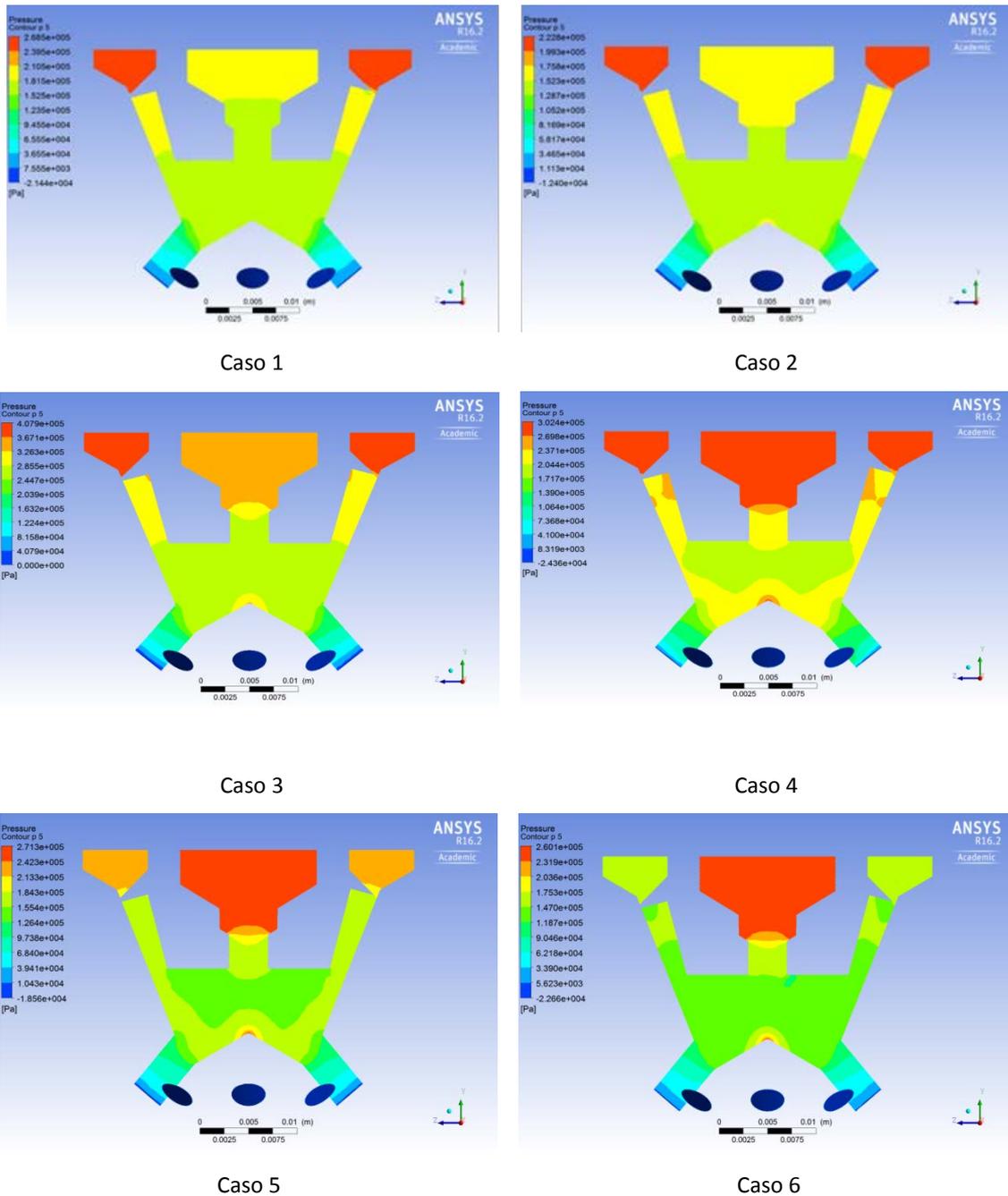


Figura 4.11. Contornos de presión

Como se comentó previamente, al considerar el aire como flujo compresible, ante cambios de velocidad, se producen cambios en la presión que provocan cambios en la densidad del aire. Estos gráficos no permiten apreciar con suficiente exactitud las variaciones de presión, pero el programa permite integrar y obtener directamente los valores de las presiones en ambas entradas y la salida. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Presiones en la boquilla

| | p_{aire} (Pa) | p_{agua} (Pa) | p_{salida} (Pa) |
|--------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Caso 1 | 183219 | 267218 | 0 |
| Caso 2 | 168989 | 221853 | 0 |
| Caso 3 | 347773 | 406270 | 0 |
| Caso 4 | 302095 | 288739 | -403 |
| Caso 5 | 270925 | 219351 | -55 |
| Caso 6 | 259754 | 174484 | -103 |

Comparando los casos 2 y 4 se observa que, al aumentar el flujo másico de aire, la presión del aire y la del agua en la entrada aumentan. Por el contrario, observando los casos 3, 4, 5 y 6 conforme se reduce la velocidad de entrada del agua, las presiones de entrada disminuyen. También se puede observar en la Figura 4.11 que al aumentar el flujo de aire, la presión en el interior de la cámara es mayor, lo que puede comprobarse comparando los casos 2 y 4.

En los casos 4, 5 y 6 la presión a la salida de la boquilla es ligeramente menor que la atmosférica de manera que tiene lugar un débil flujo inverso en esa zona. Este comportamiento puede explicarse por el propio funcionamiento de la boquilla, pero también puede estar determinado por errores de convergencia en los cálculos. Errores en la presión del orden de 500 Pa (0.05 bar) podrían considerarse despreciables al describir el funcionamiento de la boquilla. De cualquier manera, los casos 4, 5 y 6 deben analizarse con mucho cuidado, a la espera de otras simulaciones con un mallado mucho más refinado en la descarga.

Del análisis de la Figura 4.7 en conjunto con la Figura 4.11 se puede concluir que, si la presión a la entrada del agua es mucho mayor que la del aire, las dos fases no se mezclan correctamente (caso 1 y 2). Lo más conveniente para la obtención de un correcto atomizado es que la diferencia de presiones entre la entrada del agua y la del aire sea lo menor posible, como se ha comprobado en las pruebas experimentales según Ferreira en 2010 [13], Barreras et al en 2006 [5] y Barroso et al en 2014 [6]

En todos los casos anteriormente analizados se han despreciado los efectos de la gravedad sobre el flujo, así que, por último, se procede a realizar la simulación de los casos 5 y 6 considerando la gravedad. Las presiones obtenidas en estas simulaciones en comparación con las obtenidas sin considerar la gravedad se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Presiones en la boquilla con y sin considerar la gravedad

| | | p_{aire} (Pa) | p_{agua} (Pa) | p_{salida} (Pa) |
|--------|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Caso 5 | sin gravedad | 270240 | 219948 | -54 |
| | con gravedad | 270925 | 219351 | -55 |
| Caso 6 | sin gravedad | 259754 | 174484 | -103 |
| | con gravedad | 254449 | 171831 | -40 |

Como puede observarse en la Tabla 4.6, considerar los efectos de la gravedad sobre el flujo supone poca diferencia en cuanto a los valores de las presiones, efecto similarmente despreciable se ha observado en todos los parámetros analizados. Atendiendo a estos resultados, es presumible que el efecto de la gravedad pueda ser

despreciado en comparación con las presiones y la compresibilidad del aire, al analizar el proceso de mezcla del aire y el agua en la boquilla. El proceso de cálculo y la convergencia de la solución se simplifican al despreciar los efectos gravitatorios, aspecto que ha tenido su peso al decidir no incluir la gravedad en la modelación del proceso.

En trabajos futuros se pretende establecer con suficiente exactitud la importancia de la gravedad en el funcionamiento de la boquilla, así como la inclusión de otros modelos de mezcla, la consideración de la tensión superficial, y la solución no estacionaria o pseudo-transiente del problema.

5. Conclusiones

En la primera parte de este trabajo se ha desarrollado una metodología para facilitar la comprensión de la mecánica de fluidos, utilizando el análisis de los resultados de simulaciones realizadas con el programa ANSYS Fluent. Las dos fases que conforman esta metodología han previsto que el alumno pueda conocer y profundizar los estudios de dinámica de fluidos computacional (CFD) de forma gradual en diferentes asignaturas.

Como parte de la fase inicial de esta metodología se desarrollan dos casos clásicos de mecánica de fluidos a un nivel de principiantes. Para ello se han elaborado los guiones de dos prácticas de laboratorio donde se combinan tanto los trabajos experimentales como los computacionales.

El primer caso analizado en esta primera fase consiste en la simulación del flujo interior en una expansión brusca. Los resultados obtenidos permiten visualizar las líneas de corriente. El alumno puede comprobar que cuando el flujo es laminar, las partículas de fluido apenas se separan de la pared, siendo la pérdida de energía y la caída de la presión mínimas. Sin embargo, al aumentar el número de Reynolds, las partículas de fluido tras la expansión son forzadas a alejarse de la pared, de manera que en algún punto el flujo pierde el contacto con la pared y se genera una zona de baja presión donde el flujo recircula. La zona de recirculación aumenta de tamaño con el incremento del número de Reynolds. Con el análisis de este caso también se puede demostrar que, para un mismo número de Reynolds el comportamiento cinemático del flujo es el mismo, aunque el fluido sea diferente.

El segundo caso de la primera fase consiste en la simulación del campo de flujo exterior en un perfil alar. Los resultados obtenidos permiten visualizar los contornos de presión, comprobándose que existe un gradiente de presión entre la cara inferior y la superior del perfil alar, que genera la fuerza de sustentación. Mediante el desarrollo de este caso el alumno puede comparar los resultados experimentales con los computacionales, comprobando que, al aumentar el ángulo de ataque se incrementa el coeficiente de sustentación de manera aproximadamente lineal hasta el punto de entrada en pérdida (caída súbita del coeficiente de sustentación), que para el perfil analizado ocurre a un ángulo de ataque de 13° .

En la segunda fase de esta metodología se desarrollan otros dos casos de mecánica de fluidos a un nivel intermedio. Para ello se ha elaborado el guion de una práctica de laboratorio de CFD, y se ha desarrollado la simulación de un par de casos que pueden servir de base para la orientación de un trabajo tutelado independiente sobre flujos multifásicos.

Para poder cumplimentar la primera parte de esta segunda fase, orientada a que los alumnos aprendan a trabajar con el software ANSYS Fluent a un nivel intermedio, se elaboró el guion de una práctica de laboratorio para implementar el análisis del flujo bifásico en un codo de mezcla.

Para garantizar el buen éxito del trabajo tutelado que se pretende orientar en esta segunda fase de la metodología, se han implementado y desarrollado dos casos

que pueden servir de base para esta actividad; la cavitación en un estrechamiento brusco y el flujo de partículas en una tubería vertical.

Del análisis de los resultados obtenidos al simular el flujo en el estrechamiento se concluye que a partir de la garganta puede ocurrir la cavitación en dependencia de la relación de diámetros y de la presión de entrada. También se pudo comprobar que si en el estrechamiento tiene lugar la cavitación, cuanto mayor sea la presión de entrada, mayor es la longitud en la que se produce la vaporización del fluido.

Del análisis de los resultados obtenidos al simular una tubería vertical con un flujo ascendente de aire y con un inyector lateral por el que se introducen partículas se concluye que, al inclinar la tubería, las partículas más gruesas impactan con la pared del tubo, y el flujo de aire es incapaz de arrastrarlas por completo. Además, se observa que un aumento de la velocidad del aire mejora el arrastre de las partículas.

Por otra parte, en la segunda parte del trabajo se analiza el proceso de mezcla que tiene lugar en el interior de una boquilla de atomización de doble fluido.

Para el estudio de la boquilla se implementa la geometría, el mallado, los modelos y las condiciones de contorno que se requieren para el análisis del proceso de mezcla del agua y el aire.

En una primera etapa de simulación se analiza el proceso de mezcla considerando el aire como fluido incompresible. Se realizan varias simulaciones, obteniéndose que al disminuir la velocidad del agua a la entrada, las presiones de entrada disminuyen, y menor es la diferencia de presiones entre la entrada de agua y la de aire, produciéndose una mejor mezcla en la cámara.

En una segunda etapa de simulación se analiza el proceso de mezcla considerando el aire como fluido compresible. Las principales conclusiones de esta etapa se enumeran a continuación:

- a) Al aumentar el flujo másico de aire, la densidad del aire aumenta, la velocidad en la entrada a la cámara de mezcla es mayor y por lo tanto el número de Mach también. La presión del aire y del agua a la entrada aumentan, así como, el tamaño de la zona de recirculación del aire en la cámara. Todo esto favorece la zona de mezclado y el proceso de mezcla
- b) Al disminuir la velocidad del agua a la entrada, disminuye la densidad del aire, y las presiones del aire y del agua a la entrada. Aunque el número del Mach aumenta, el proceso de mezcla empeora
- c) Si la presión a la entrada del agua es mucho mayor que la del aire, las dos fases no se mezclan correctamente. Lo más conveniente para la obtención de un correcto mezclado es que la diferencia de presiones entre la entrada del agua y la del aire sea lo menor posible

En ambos análisis del atomizador se despreciaron los efectos de la gravedad, así que se realizó un último análisis considerando los efectos gravitatorios sobre el flujo. Los resultados obtenidos permiten concluir que al despreciar los efectos de la gravedad en el estudio del flujo de mezcla en un atomizador no se introducen errores de consideración, y por el contrario, la consideración de la gravedad complica la convergencia de la solución.

Trabajos futuros

Este trabajo ha estado centrado en el aprendizaje del programa de CFD ANSYS Fluent y en su utilización para simular flujos con diferentes características. Es indiscutible que al analizar casos con relativa complejidad como los flujos multifásicos se requiere mucho mayor tiempo y preparación para lograr describir con suficiente exactitud el fenómeno, así como, una versión del software que no esté restringido a un nivel de estudiante. En consideración del autor es imprescindible realizar un análisis más profundo en relación con la calidad del mallado realizado, los modelos seleccionados y los métodos de solución de las ecuaciones establecidos. En este sentido sería útil estudiar los siguientes aspectos en trabajos futuros:

- a) Si el refinamiento de la malla, sobre todo en aquellas zonas donde existen cambios importantes en los parámetros del flujo, podría mejorar la calidad de los resultados obtenidos
- b) Si la utilización de otros modelos de mezcla disponibles, así como la inclusión de parámetros no considerados, como por ejemplo, la tensión superficial, podrían modificar los resultados de las simulaciones
- c) Si la consideración de un modelo no estacionario, o un método de solución de las ecuaciones pseudo-temporal podría aportar mejoras en la convergencia

Por otra parte, el objetivo final del estudio de un atomizador es describir el propio proceso de atomización, así que, el trabajo futuro más importante es implementar la simulación del proceso de atomización. Para ello, los resultados obtenidos en estas simulaciones de mezclado permiten disponer de las características del flujo que sale de las boquillas. Este flujo en la descarga del atomizador será la condición de contorno de entrada a un dominio abierto a presión atmosférica, donde se implementarán diferentes modelos de rompimiento de gotas para tratar de simular y describir el proceso de atomización.

6. Referencias

- [1] ANSYS. [Fecha de consulta 2016]
<https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal>
- [2] ANSYS Fluent Tutorial Guide. Chapter 1: Introduction to using ANSYS Fluent in ANSYS Workbench; Fluid flow and heat transfer in a mixing elbow.
- [3] Akbari, V. Aramesh, R. Borhani, T. N. G. Hamid, M. K. A. Hussain, M. A. Shamiri, A. (2015). 2D CFD-PBM simulation of hydrodynamic and particle growth in an industrial gas phase fluidized bed polymerization reactor. *Chemical Engineering Research and Design, Volume 104, Pages 53-67.*
- [4] Baranyi, L. Dhiman, A. Khandelwal, V. (2015). Laminar flow of non-Newtonian shear-thinning fluids in a T-channel. *Computers & Fluids, Volume 108, Pages 79-91.*
- [5] Barreras, F. Barroso, J. Lincheta, E. Lozano, A. (2006). Experimental characterization of industrial twin- fluid atomizers. *Atomization and Sprays, Volume 16, Pages 127-145.*
- [6] Barroso, J., Lozano, A.; Barreras, F., Lincheta, E. (2014). Analysis and prediction of the spray produced by an internal mixing chamber twin-fluid nozzle. *Fuel Processing Technology, Volume 128, Pages 1-9.*
- [7] Bhaskaran, R. Cornell University. [Fecha de consulta 2015]
<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Turbulent+Pipe+Flow>
- [8] Bhaskaran, R. y Singleton, J. Cornell University. [Fecha de consulta 2015]
<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Laminar+Pipe+Flow>
- [9] Bhaskaran, R. y Singleton, J. Cornell University. [Fecha de consulta 2015]
<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Steady+Flow+Past+a+Cylinder>
- [10] Bhaskaran, R. y Singleton, J. Cornell University. [Fecha de consulta 2015]
<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+-+Unsteady+Flow+Past+a+Cylinder>
- [11] Çengel, Yunus A. y Cimbala, John M. Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones. Segunda edición. Capítulo 15.
- [12] Cornell University. [Fecha de consulta 2015]
<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules>

[13] Ferreira, G. A. (2010). Study of the flow inside a twin fluid atomizer with internal mixing chamber and its influence on spray quality. Doctoral Thesis submitted to University of Zaragoza.

[14] Sediva, S. Uher, M. (2012). Analysis of the Effect of Body Shape of Multiport Averaging Pitot Tube on Permanent Pressure Loss Using ANSYS/FLUENT. *IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 7, Pages 322-326.*

[15] Universidad Politécnica de Madrid. [Fecha de consulta 2016]
<http://www.upm.es/internacional/Students/f88302cdb97ed410VgnVCM10000009c7648aRCRD>

[16] Youtube [Fecha de consulta 2016]
https://www.youtube.com/results?search_query=ANSYS+

ANEXO 1: Práctica de laboratorio.

Densidad y líneas de corriente

Guion de práctica de laboratorio sobre densidad y líneas de corriente

1. Objetivos

- a) Conocer y aplicar dos métodos de medida de densidad
- b) Comprobar la dependencia de la densidad con la temperatura
- c) Analizar la influencia de las propiedades físicas (densidad y viscosidad) sobre las líneas de corriente y los fenómenos de separación, recirculación y punto de reconexión
- d) Comprobar la importancia del número adimensional de Reynolds sobre las características cinemáticas del flujo.

2. Introducción

Esta práctica de laboratorio trata de la medida de una propiedad muy importante de los fluidos: la densidad. También se aborda la influencia de esta y otras propiedades sobre el comportamiento cinemático del flujo.

3. Parte 1. Densidad

3.1 Fundamentación teórica

El conocimiento de la densidad permite comprender muchos fenómenos que ocurren en la vida cotidiana. Las preguntas que se formulan a continuación podrán responderse al concluir esta práctica de laboratorio.

¿De qué depende que un cuerpo sólido flote o no en un líquido? ¿De su volumen? ¿De su peso? ¿De su densidad? ¿De alguna combinación de las anteriores?

¿Por qué la madera flota en el agua mientras que un ancla de metal se hunde? ¿Por qué los globos de helio flotan en el aire?

La carga en la batería de un coche es una solución ácida. Conforme la batería descarga electricidad, el ácido se combina para formar un nuevo producto químico. Este producto formado posee una densidad inferior a la de la solución ácida inicial. ¿Cómo se podría determinar el nivel de carga remanente en la batería?

La densidad es una propiedad que ayuda a caracterizar un barniz o una pintura y que se utiliza como parámetro fundamental para el control de calidad del producto. La densidad de la pintura depende mucho de su composición, debido a que sus

componentes pueden poseer diferencias de densidad importantes. Existen disolventes y resinas con densidades que van desde los 800 hasta los 1300 kg/m³, así como, barnices y pigmentos con diferencias superiores. El valor de la densidad tiene una influencia importante al determinar la proporción de la mezcla y el espesor de recubrimiento de la pintura.

La densidad posee especial importancia al realizar cálculos de rendimientos económicos, cuando algunas de las sustancias involucradas se valoran en peso y otras en volumen.

¿Cómo se sabe en qué momento de maceración se encuentra el vino en una bodega?

El dato de la densidad siempre se incluye en la ficha técnica de un producto, ya que aporta información muy útil.

La densidad de un material o sustancia se define como la masa contenida en la unidad de volumen. Es una propiedad que permite identificar la sustancia independientemente de la masa que tenga o del volumen que ocupe. La densidad de sustancias homogéneas (con distribución de masa uniforme) se puede determinar como la razón entre la masa y el volumen que ocupa la sustancia:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Sus dimensiones son ML⁻³ y sus unidades, en el S.I., kg/m³. ¿Cómo se puede medir la densidad?

Método de medición directa de la masa y del volumen de la sustancia

Con una balanza se mide la masa de un recipiente limpio y seco. Se vierte en el recipiente, previamente tarado, un volumen conocido del líquido del que se desea medir la densidad. Se vuelve a pesar el conjunto y se resta la masa del recipiente seco. Conocida la masa y el volumen de la sustancia se obtiene la densidad por la ec. (3.1).

El error cometido al determinar la densidad mediante este método es la siguiente:

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial m}\Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial V}\Delta V\right)^2}, \quad (3.2)$$

donde el primer término dentro de la raíz cuantifica la incertidumbre en la medición de la masa de la sustancia, y el segundo la incertidumbre en la determinación del volumen. Las derivadas parciales se obtienen de la ecuación (3.1):

$$\frac{\partial\rho}{\partial m} = \frac{1}{V} \quad \text{y} \quad \frac{\partial\rho}{\partial V} = -\frac{m}{V^2}.$$

Así que:

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{V}\Delta m\right)^2 + \left(-\frac{m}{V^2}\Delta V\right)^2}, \quad (3.3)$$

donde Δm es la incertidumbre en la medición de la masa y ΔV es la incertidumbre en la determinación del volumen. Para un matraz aforado se puede

considerar que la incertidumbre en el volumen solamente depende de la incertidumbre con que se enrase el nivel del líquido con la marca de aforo, es decir:

$$\Delta V = \pi r^2 \Delta L$$

Por lo visto hasta aquí, para determinar la incertidumbre con este método de medición de densidad puede emplearse la siguiente ecuación:

$$\Delta \rho = \sqrt{\left(\frac{1}{V} \Delta m\right)^2 + \left(-\frac{m}{V^2} \pi r^2 \Delta L\right)^2} \quad (3.4)$$

Para el matraz utilizado en esta práctica se puede estimar que la incertidumbre en la medición de la longitud es $\Delta L = 0.5 \text{ mm}$, mientras que la masa medida en la balanza que se usa presenta una incertidumbre $\Delta m = 0.1 \text{ g}$. El radio de la parte aforada del matraz es $r = 9 \text{ mm}$.

Otro método para medir la densidad de líquidos es utilizando un densímetro o areómetro.

Método del densímetro o areómetro

En la Figura 3.1 se muestran diferentes areómetros, así como la forma correcta de visualizar la medida del instrumento.

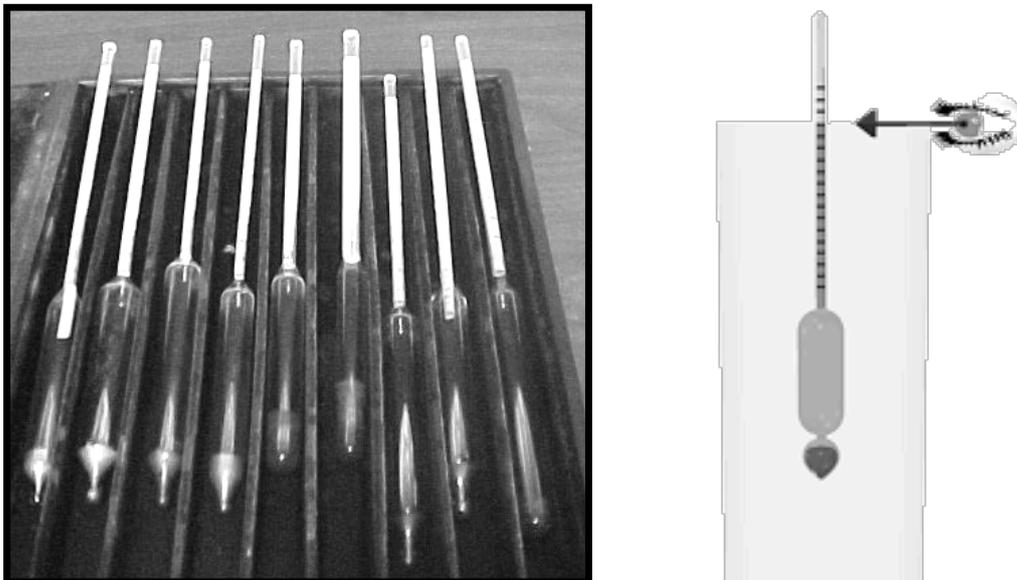


Figura 3.1. Densímetros y forma correcta de visualizar la medida

El densímetro o areómetro es un instrumento para medir directamente la densidad de un líquido sin conocer su masa y volumen. Este aparato es un tubo de vidrio con una carga de plomo interna. El tubo presenta una escala graduada. El aparato se sumerge en un líquido de densidad desconocida. Cuando se encuentre estable (sin oscilaciones) y separado de las paredes del recipiente, puede leerse en la escala el valor de la densidad. Es necesario disponer de varios densímetros con diferentes rangos de medida complementarios. Cuando se sumerge la cápsula del densímetro seleccionado en el líquido a medir, la línea de flotación se situará en la zona de la escala del aparato donde se puede leer directamente la densidad. En caso

de que la línea de flotación se sitúe fuera de la escala, se cambia de densímetro, tomando otro que posea una escala inmediata superior o inferior, según hacia donde se haya producido la desviación.

Principio de funcionamiento del areómetro

Cuando el instrumento se introduce en el líquido, queda flotando y sobresale una porción del vástago. La parte sumergida desaloja un volumen de líquido V_L . Según el principio de Arquímedes, la fuerza de flotación $F_B = \rho_L g V_L$ es igual al peso de todo el areómetro $W_i = m_i g$, donde m_i es la masa del propio instrumento, así que,

$$\rho_L g V_L = m_i g$$

Y la densidad del líquido es:

$$\rho_L = \frac{m_i}{V_L} \tag{3.5}$$

Esta expresión es válida para cualquier líquido, así que, cuando el areómetro se introduce en agua $\rho_w = \frac{m_i}{V_w}$ y cuando se introduce en otro líquido cualquiera $\rho_L = \frac{m_i}{V_L}$. Así, la diferencia entre los volúmenes desplazados en el agua y en el otro líquido puede determinarse despejando los volúmenes en las dos ecuaciones anteriores:

$$V_w - V_L = m_i \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_L} \right) \tag{3.6}$$

Note que la masa del instrumento, m_i , es la misma en ambos casos.

Si se va a medir la densidad de líquidos más densos que el agua ($\rho_L > \rho_w$), la diferencia del miembro derecho es positiva y el areómetro se hunde menos ($V_w > V_L$). Para fluidos menos densos que el agua, $\left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_L} \right) < 0$, y por lo tanto $V_w < V_L$, es decir, el areómetro se hunde más para fluidos menos densos que el agua.

Como la diferencia de los dos volúmenes sumergidos es el de un cilindro, $V_w - V_L = \pi r^2 L$, con L la diferencia de longitudes entre las zonas sumergidas del vástago al utilizar agua y otro líquido, se obtiene que

$$\pi r^2 L = m_i \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_L} \right),$$

de donde resulta la densidad del líquido problema:

$$\rho_L = \frac{1}{\frac{1}{\rho_w} - \frac{\pi r^2 L}{m_i}}$$

O bien

$$\rho_L = \frac{m_i \rho_w}{m_i - \pi r^2 L \rho_w} \tag{3.7}$$

Los areómetros se calibran en fábrica, a través de la ecuación (3.7), y se les dota de una escala que relaciona directamente la longitud del vástago sumergida con la densidad de la sustancia.

Con el areómetro calibrado se mide directamente la densidad del líquido, así que la incertidumbre de la medida es la mínima apreciación que permita la escala del instrumento, que en el juego de densímetros utilizado es $\Delta\rho_L = 1 \text{ kg/m}^3$.

3.2 Planteamiento de casos para la parte de densidad

El objetivo de esta parte de la práctica es la determinación de la densidad de varias sustancias en distintas condiciones con diferentes métodos de medida. Se propone analizar los casos descritos a continuación.

Caso 1

En el laboratorio de calidad de la empresa Coca-Cola cada día se comprueban muestras de los tipos de refresco de esta marca que se producen y se envían al mercado. Usted debe obtener y comparar los valores de la densidad de la Coca-Cola normal y la light o la zero (dos sustancias). Utilice el método de la balanza para realizar este experimento. Calcule el error que se comete al medir la densidad de las muestras a través de la ecuación (3.4).

El refresco se transporta todos los días en un camión no frigorífico. Valore cómo afecta la temperatura a la densidad del producto (evalúe al menos tres temperaturas). Esta comprobación se realizará con una sola muestra de Coca-Cola, utilizando el método de la balanza y evaluando al menos dos temperaturas (50° y 80°) además de la ambiente. Sabiendo que la densidad disminuye con la temperatura, compruebe si esta tendencia se cumple en la muestra ensayada.

Caso 2

En el laboratorio de calidad de una empresa se han recibido varias muestras de líquidos que van a ser utilizados en una instalación industrial. Seleccione tres muestras de líquidos a evaluar, teniendo en cuenta que es obligatorio que uno de los líquidos seleccionados sea la salmuera. Determine la densidad de cada sustancia utilizando el juego de densímetros. Verifique si la densidad de estas muestras se encuentra dentro del rango correcto para su uso o hay que rechazarlas (tenga en cuenta la incertidumbre de la medida). Los rangos aceptables para las diferentes sustancias disponibles se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Rangos de densidad aceptables para las diferentes sustancias

| Muestras | Rango de densidad (kg/m ³) |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
| Salmuera 20% de concentración másica | 1140 - 1160 |
| Alcohol | 770 - 790 |
| Glicerina | 1259 - 1262 |
| Aceite ligero | 900 - 920 |
| Leche | 1020 - 1034 |
| Vinagre | 1001 - 1008 |
| Refrigerante | 1225 - 1227 |

3.3 Cuestiones

Las respuestas a las cuestiones que se plantean a continuación deben justificarse con los resultados de los experimentos realizados.

¿Qué método de medida de densidad le parece más eficaz, rápido y fiable?

¿Qué posibles fuentes de error existen en la medida de densidad?

¿Cómo varía la densidad en función de la temperatura?

4. Parte 2. Cinemática: líneas de corriente en una expansión brusca

Para realizar esta parte de la práctica se trabajará con el software ANSYS ACADEMIC. En el ADD se explica la forma de instalar este programa en los ordenadores personales de los estudiantes que dispongan de sistema operativo Windows de 64 bits.

4.1 Análisis del flujo a través de una expansión brusca

En esta parte de la práctica se modela una expansión 2D. El flujo se supone axisimétrico (simétrico con respecto al eje). Se especifica el radio y la longitud de las tuberías de entrada y salida. En el programa de cálculo se dispone de tres tipos de malla según la densidad de las celdas; gruesa, media y fina. En una de las ventanas del programa se puede cambiar la velocidad de entrada, así como, la densidad y la viscosidad del fluido dentro de unos límites establecidos. También se pueden especificar el número de iteraciones, el límite de convergencia, y la localización donde se guardan los ficheros del proyecto. Al ejecutar el programa se obtiene la presión total en la entrada y en la salida, la velocidad en la salida, y la fuerza de fricción en la pared. Una vez concluidos los cálculos se pueden visualizar los siguientes gráficos: el comportamiento de los residuos durante las iteraciones; la velocidad, la presión estática y la presión total a lo largo de la línea central; la presión estática, la presión total, y los esfuerzos cortantes a lo largo de la pared del tubo; y por último, los perfiles radiales de la velocidad axial en diferentes planos XY. Además se pueden visualizar los contornos de presión, de velocidad y las líneas de corriente. También está disponible una figura con los vectores de velocidad.

Introducción

Una expansión brusca crea una separación de la capa límite de la pared, lo que resulta en una caída de presión significativa. La magnitud de la caída de presión depende del número de Reynolds y de la relación geométrica de la expansión. En la mayoría de los casos es deseable minimizar la caída de presión en un sistema de tuberías, ya que ésta se correlaciona con la pérdida de energía. En esta simulación es posible evaluar los efectos que ocasiona la separación de la capa límite sobre las líneas de corriente y sobre el coeficiente de pérdidas.

Planteamiento del problema

Un líquido con densidad ρ y viscosidad μ fluye a través de la expansión brusca con una velocidad de entrada v_1 . Se debe calcular el coeficiente de pérdidas (mal denominado en el programa **Discharge Coefficient**) y el comportamiento de las líneas

de corriente para diferentes números de Reynolds (Re). Se debe prestar especial atención a la influencia del Re sobre las líneas de corriente.

El número adimensional de Reynolds en la entrada se determina como

$$Re = \frac{\rho v_1 D_1}{\mu} \quad (4.1)$$

Donde,

v_1 = Velocidad media a la entrada de la expansión

$D_1 = 2R_1$ = Diámetro de la tubería en la entrada

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad del fluido

Detalles de la simulación

La región de fluido se representa en dos dimensiones. El procedimiento para resolver el problema es:

- ✓ Crear la geometría
- ✓ Establecer las propiedades del material y las condiciones de contorno
- ✓ Mallar el dominio
- ✓ Resolver el programa

Todas las operaciones se llevan a cabo en el entorno ANSYS Workbench (WB). Para facilitar el uso, los productos individuales de ANSYS se ejecutan en segundo plano, y el usuario sólo ve el entorno del Tutorial. Por lo tanto, la geometría y la malla se crean en ANSYS DesignModeler (DM) y ANSYS Meshing (M), respectivamente, en un segundo plano. La malla se exporta al ANSYS FLUENT. Las condiciones de contorno y propiedades de flujo se establecen a través de archivos de comandos parametrizados. ANSYS FLUENT converge el problema hasta que se cumpla el límite de convergencia o se alcance el número de iteraciones especificado.

Lanzamiento del programa de simulación

Para iniciar el tutorial debe seguir los siguientes pasos:

1. Lanzamiento del espacio de trabajo Workbench
 - a. Haga clic en el menú de inicio
 - b. Ir a Todos los programas > ANSYS 16.2 > Workbench
2. Seleccionar el menú "Studies" en Workbench de manera que se muestren los nombres de los tutoriales disponibles.
3. Haga clic en el nombre del tutorial que desee resolver para que aparezca la interfaz gráfica de usuario (IGU) del tutorial. En este caso debe seleccionar **Flow Through and Expansion**. Leer el **Overview** y abrir las indicaciones con **Open Document**.

En la Figura 4.1 se muestra el entorno de trabajo de ANSYS Workbench.

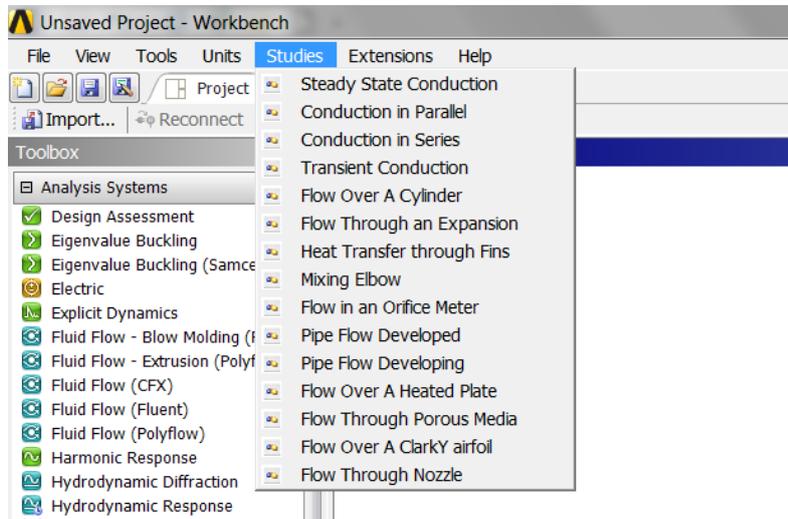


Figura 4.1. Entorno de ANSYS Workbench

La interfaz gráfica de usuario (IGU) posee 7 pestañas de encabezamiento. Las pestañas se denominan: **Overview**, **Geometry**, **Physics**, **Boundary Condition**, **Mesh**, **Solve** y **Report**. En general, la solución al problema progresará desde la izquierda a derecha (ver Figura 4.2).

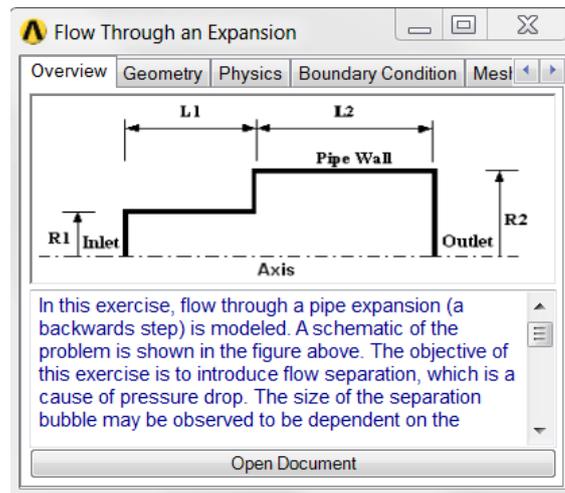


Figura 4.2. Pestañas en cada tutorial

En los siguientes párrafos se explica la forma en que se debe ejecutar el programa tutorial de ANSYS FLUENT.

Geometry

La geometría consiste en una pared de la tubería, una línea central, una entrada y una salida. Se pueden especificar la longitud y el radio de la tubería de entrada y de salida. El campo de flujo se supone que es simétrico con respecto al eje y el problema se resuelve en dos dimensiones (ver Figura 4.3).

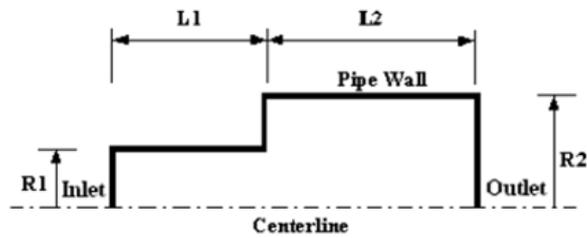


Figura 4.3. Esquema del dominio de flujo

En la Figura 4.4 se muestra la pestaña **Geometry**.

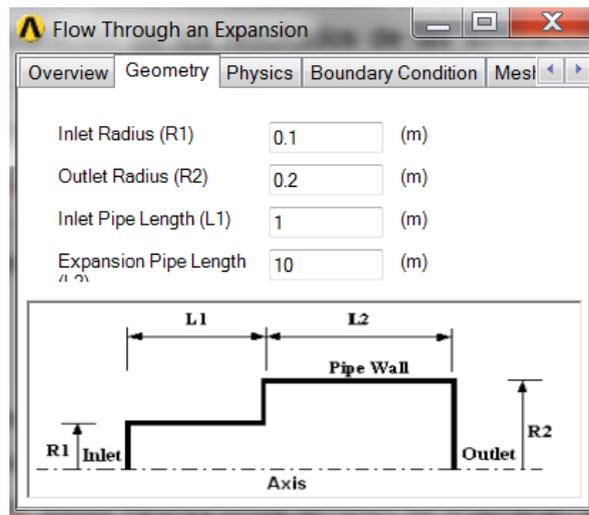


Figura 4.4. Pestaña **Geometry** del tutorial

Los parámetros numéricos que pueden especificarse por el usuario deben introducirse con precaución. Como guía, los valores recomendados mínimos (Min) y máximos (Max) de estos parámetros se muestran en la Tabla 4.1. El uso de un valor fuera del rango recomendado puede provocar una disminución de exactitud o la imposibilidad de converger a una solución.

Tabla 4.1: Límites de los parámetros geométricos utilizados en el ejercicio

| Parámetro | Límite | |
|-----------------|--------|--------|
| | Mínimo | Máximo |
| Radio R1 (m) | 0.1 | 10 |
| Radio R2 (m) | 0.2 | 10 |
| Longitud L1 (m) | 1 | 100 |
| Longitud L2 (m) | 10 | 200 |

Para la primera simulación del programa no modifique los valores que aparecen por defecto:

$$R_1 = 0.1 \text{ m} \quad R_2 = 0.2 \text{ m} \quad L_1 = 1 \text{ m} \quad L_2 = 10 \text{ m}$$

Physics

En este apartado se definen las propiedades del fluido (material). En la Figura 4.5 se muestra la pestaña **Physics**.

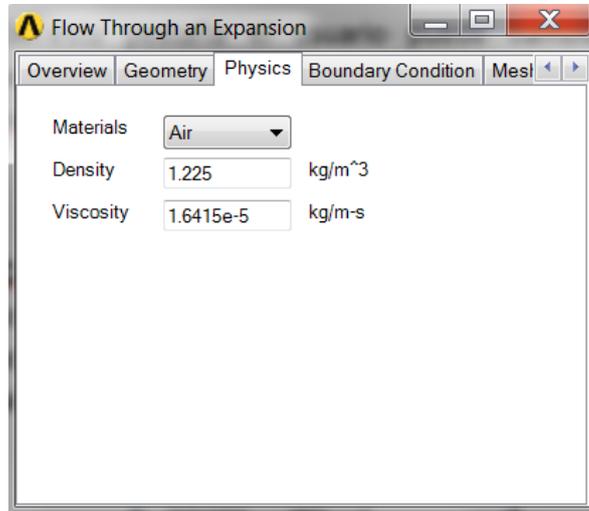


Figura 4.5. Pestaña **Physics** del tutorial

El material por defecto es aire. Las siguientes propiedades de los materiales pueden especificarse:

- ✓ Densidad
- ✓ Viscosidad

Otros materiales tales como glicerina, agua, y un fluido definido por el usuario también pueden ser seleccionados.

Tabla 4.2: Límites de los parámetros físicos utilizados en el ejercicio

| Parámetro | Límite | |
|-------------------------------|--------|--------|
| | Mínimo | Mínimo |
| Densidad (kg/m ³) | 1 | - |
| Viscosidad (kg/m-s) | 1e-05 | - |

Para la primera simulación del programa deje los valores que aparecen por defecto:

Materials = Air

Density = 1.225 kg/m³

Viscosity = 1.6415 kg/ms

Boundary Condition

La pestaña **Boundary Condition** se muestra en la Figura 4.6.

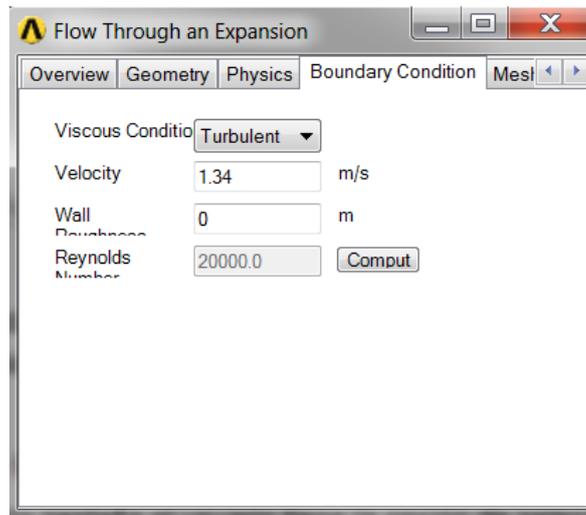


Figura 4.6. Pestaña **Boundary Condition** del tutorial

Las siguientes condiciones de contorno se asignan en ANSYS CFD Académico.

Tabla 4.3: Condiciones de contorno asignadas en ANSYS CFD Académico

| Frontera (Boundary) | Asignada como |
|------------------------------|-----------------|
| Inlet | Periodic |
| Outlet | Periodic |
| Center-Line | Axis |
| Pipe Wall | Wall |

En esta pestaña se puede fijar la velocidad (**Velocity**) del fluido a la entrada y la rugosidad de la pared (**Wall Roughness**), este último parámetro solo está disponible para flujo turbulento. Con el botón **Compute** se puede determinar el Re y automáticamente se establece si el flujo es laminar o turbulento.

Al establecer el tipo de flujo en **Boundary Condition** se aplica el modelo físico de simulación adecuado. En la Tabla 4.4 se muestran los modelos que se aplican según el número de Reynolds.

Tabla 4.4: Modelos de turbulencia basados en el número de Reynolds del tubo

| Re | Modelo Utilizado |
|--------------------------|----------------------------------------------------------|
| $Re < 1000$ | Laminar Flow |
| $1000 \leq Re \leq 1800$ | Low Reynolds Number k-ϵ model |
| $1800 < Re \leq 40000$ | k-ϵ model |
| $Re > 40000$ | k-ϵ model |

Se recomienda no superar los números de Reynolds de $1e6$.

Para la primera simulación del programa establezca los siguientes valores:

$$\mathbf{Velocity} = 1.34 \text{ m/s}$$

$$\mathbf{Wall Roughness} = 0$$

Pinchar sobre **Compute** para determinar el número de Reynolds, que debe ser 20000 para las condiciones establecidas (diámetro en la entrada y tipo de fluido) en la primera simulación. Puede comprobar, variando la velocidad, que si el número de Reynolds es mayor que 1000 el parámetro **Viscous Condition** se fija en **Turbulent**.

Importante: apunte el número de Reynolds evaluado.

Mesh

En la Figura 4.7 se muestra la pestaña **Mesh**.

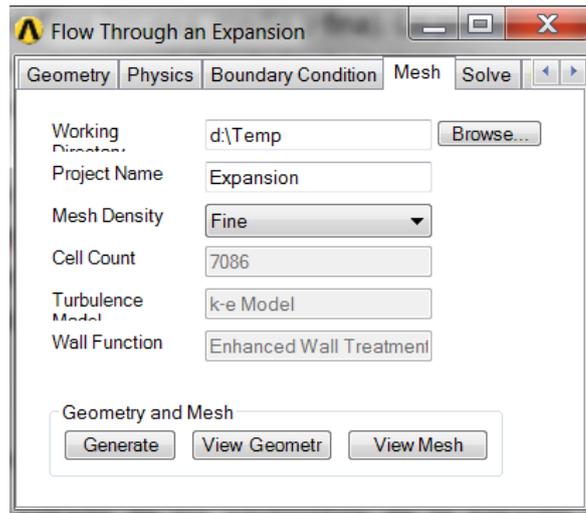


Figura 4.7. Pestaña **Mesh** del tutorial

En este apartado se debe establecer el nombre del proyecto y la dirección donde se guarda. Para esto debe hacer clic sobre **Browse** y en el directorio “C:Temp” crear una carpeta denominada PL1name, donde name se refiere a su nombre. Por último, establezca un nombre para el proyecto, por ejemplo, “Expansion”. Evite los acentos y otros símbolos en los nombres y carpetas del proyecto.

Para confeccionar el mallado del dominio están disponibles los tipos **Coarse**, **Medium** and **Fine**, es decir, malla gruesa, media y fina. La densidad de la malla varía en función del factor de refinamiento asignado. Los valores del factor de refinamiento que se establecen para las distintas densidades de malla asignadas en esta práctica se dan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Factor de refinamiento de la malla

| Densidad de la malla | Factor de refinamiento |
|----------------------|------------------------|
| Fina | 1 |
| Media | 1.414 |
| Gruesa | 2 |

Para todas las simulaciones del programa establezca una malla fina.

Haga clic sobre el botón **Generate** para generar la malla. El programa necesita un tiempo para hacer la geometría y el mallado. Una vez finalizado el

proceso de mallado, aparece en la ventana **Cell Count = 7086, Turbulence Model = k-e model** y **Wall function = Enhanced Wall Treatment**.

Al hacer clic sobre **View Mesh** se puede ver la malla y la geometría del proyecto. Para esto, en el nuevo programa que se abre, debe pinchar encima de **Mesh** en **Outline** en la ventana izquierda y con los botones señalados con la elipse de color rojo en la Figura 4.8 ampliar y colocar la imagen en la posición que desee. Una vez concluida esta exploración debe cerrar el programa de mallado con la X en la parte superior derecha del programa **Meshing**. Tenga cuidado de no cerrar el programa principal Workbench.

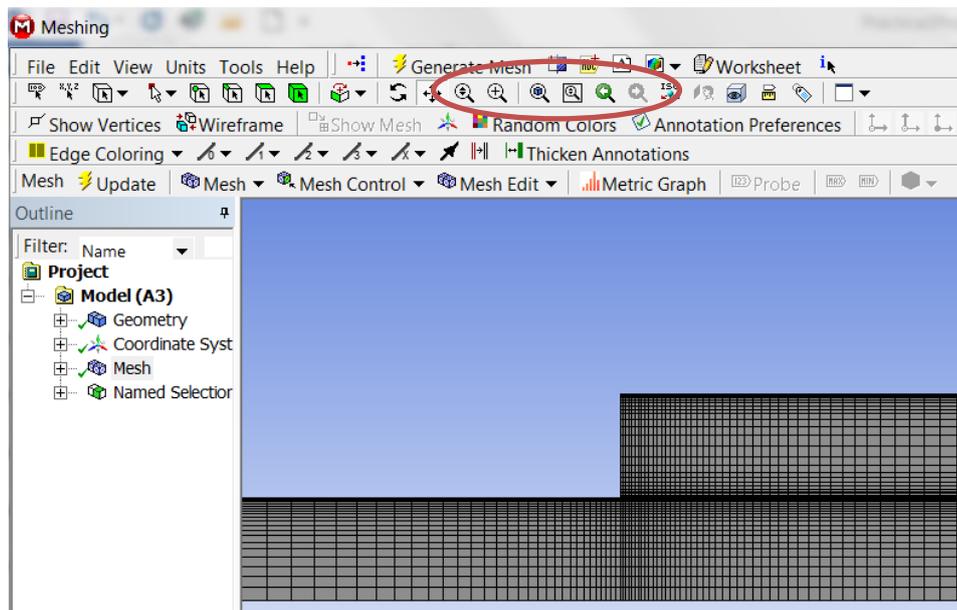


Figura 4.8. Malla fina para una expansión brusca

Solve

En este apartado se seleccionan los parámetros para la solución numérica. La pestaña **Solve** se muestra en la Figura 4.9.

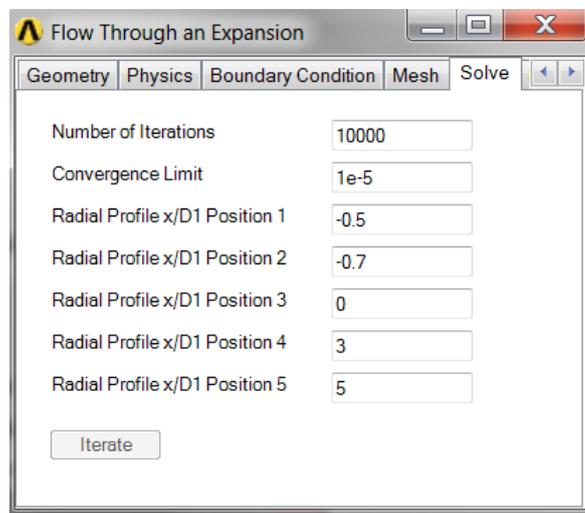


Figura 4.9. Pestaña **Solve** del tutorial

Se recomienda no modificar los valores de esta pestaña.

La malla se exporta a ANSYS Academic FLUENT junto con las propiedades físicas y las condiciones iniciales y de contorno especificadas. Las propiedades de los materiales, las condiciones iniciales y las instrucciones para el cálculo se proporcionan a través de un archivo de comandos. Una vez que la solución se hace converger o se cumple el número de iteraciones especificado, ANSYS Academic FLUENT exporta los datos a un archivo .cas y otro archivo .dat. ANSYS CFD-Post lee el archivo .dat para las actividades de procesamiento posterior.

Haga clic sobre **Iterate** para iniciar el cálculo de simulación. Debe aparecer una ventana de color negro con los residuos del cálculo y el número de iteraciones (ver Figura 4.10). El cálculo termina y la ventana desaparece cuando los residuos son menores que el criterio de convergencia establecido (**Convergence Limit = $1e-5$**), o cuando la cantidad de iteraciones supera el valor prefijado (**Number of Iterations = 10000**). Durante el tiempo de cálculo y procesamiento aparece un mensaje de color rojo en la parte inferior de la ventana y las funciones se quedan bloqueadas. No desespere, no debe realizar ninguna tarea con el programa hasta que desaparezca el mensaje de color rojo en la parte inferior de la pestaña **Solve**.

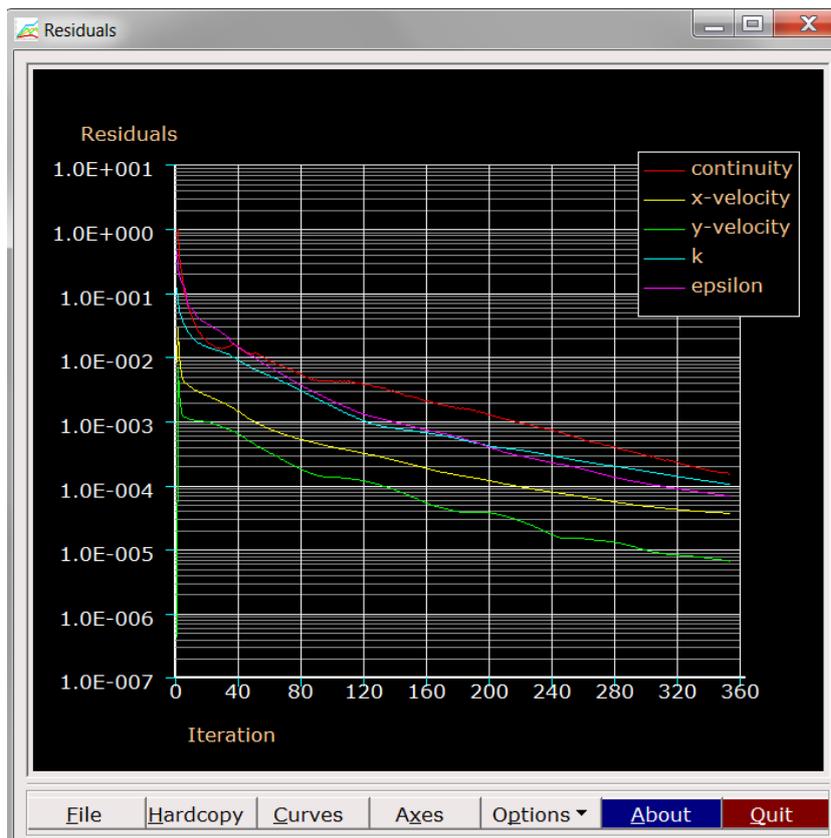


Figura 4.10. Pestaña de residuos del tutorial

Report

En la Figura 4.11 se muestra la pestaña **Report**.

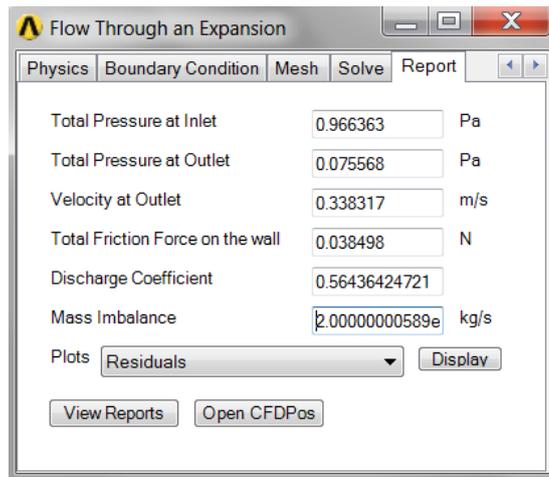


Figura 4.11. Pestaña **Report** del tutorial

En esta pestaña se pueden visualizar los resultados obtenidos de manera individual (parámetros y figuras) o en forma conjunta generando un fichero de solución general con **View Reports**.

En primer lugar aparecen los parámetros de cálculo principales (**Total Pressure at Inlet**, **Total Pressure at Outlet**, **Velocity at Outlet**, **Total Friction Force at Wall**, **Discharge Coefficient** y **Mass Imbalance**). También se pueden ver las distintas gráficas obtenidas en la simulación seleccionando el tipo en la lista desplegable al lado de **Plots** y haciendo clic en el botón **Display**. Se pueden visualizar las siguientes figuras: **Residuals**, **Centerline Velocity Distribution**, **Centerline Static Pressure Distribution**, **Centerline Total Pressure Distribution**, **Exit-pipe Static Pressure Distribution**, **Exit-pipe Total Pressure Distribution**, **Radial Profiles of Axial Velocity**, etc.

Importante. Debe apuntar los siguientes resultados: el **Discharge Coefficient**, **Total Pressure at Inlet** y **Outlet**, **Velocity at Outlet**. También puede observar las diferentes figuras, por ejemplo, seleccionando **Centerline Velocity Distribution** en el menú extensible **Plots** y haciendo clic sobre **Display**.

Resultados del ejercicio

A medida que el fluido fluye a través de una expansión, todas las partículas de fluido poseen mayor fuerza de inercia a mayor número de Reynolds, y en una expansión repentina, las partículas de fluido cerca de la expansión son forzadas hacia el exterior, pierden su contacto con la pared y el flujo se separa. Debido a la separación del flujo, se forma una región de baja presión aguas abajo que ocasiona refluo y hace que el líquido recircule. La región donde el líquido recircula se llama "zona de recirculación". La energía que posee el líquido se desperdicia en su recirculación lo que se traduce en una caída de presión significativa y un aumento del coeficiente de pérdidas (**Discharge Coefficient**). La magnitud del coeficiente de pérdidas depende del número de Reynolds y de la razón de expansión geométrica. La razón de expansión es la relación entre el diámetro de salida y el de entrada a la tubería. En la mayoría de los casos, es deseable minimizar la caída de presión en un sistema de tuberías, reduciendo al mínimo la separación del flujo, ya que la caída de presión es función de la pérdida de energía.

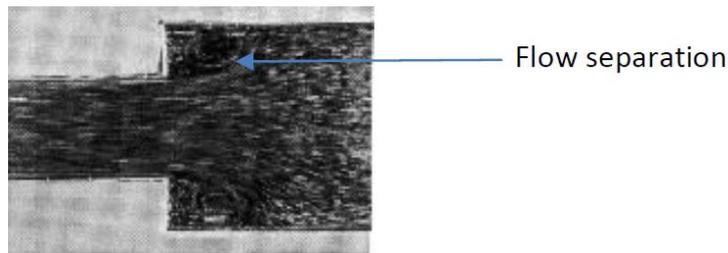


Figura 4.12. Imagen de la separación del flujo en una expansión brusca

Source: http://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/separation.html

Estableciendo los parámetros orientados en los apartados anteriores, es decir,

- ✓ Material = Aire
- ✓ Densidad = 1.225 kg/m^3
- ✓ Viscosidad = 1.6415 e-5 kg/ms
- ✓ Radio de entrada = 0.1 m
- ✓ Radio de salida = 0.2 m
- ✓ Longitud de la tubería de entrada = 1 m
- ✓ Longitud de la tubería de salida (expansión) = 10 m
- ✓ Velocidad = 1.34 m/s
- ✓ Número de Reynolds = 20000
- ✓ Malla = fina

Al hacer clic sobre **View Report** para generar un Informe del proyecto, en la **Figure 3** del Informe obtenido se muestran las líneas de corriente, que deben ser similares a las que se muestran en la Figura 4.13.

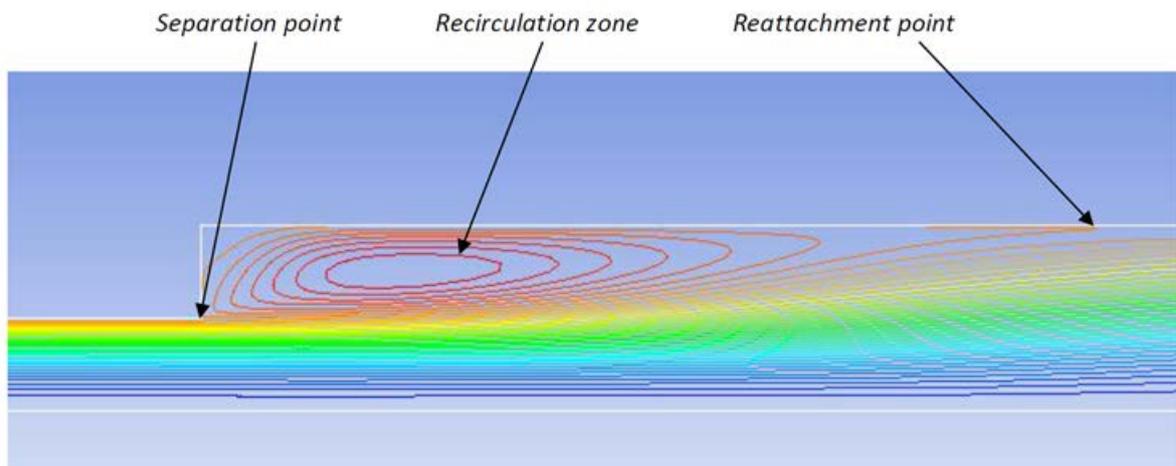


Figura 4.13. Líneas de corriente con la zona de recirculación debido a la separación del flujo

En esta figura se puede localizar el punto de separación (**Separation point**), la zona de recirculación (**Recirculation zone**) y el punto de reconexión del flujo a la pared (**Reattachment point**).

La caída de presión y el coeficiente de pérdidas en una expansión brusca dependen tanto del número de Reynolds (Re) como de la relación de expansión. La relación de expansión se determina por la siguiente ecuación,

$$RE = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.2)$$

Donde R_1 y R_2 son los radios del tubo antes y después de la expansión brusca.

El coeficiente de pérdidas se puede determinar por la siguiente ecuación empírica en función de la RE ,

$$k = \left(1 - \frac{1}{RE^2}\right)^2 \quad (4.3)$$

El valor de coeficiente de pérdidas para diferentes valores de la relación de expansión (RE) se da en la Tabla 4.6. Se observa que el aumento de la relación de expansión provoca el aumento del coeficiente de pérdidas, lo que se debe principalmente a la separación del flujo en la expansión.

Tabla 4.6: Coeficiente de pérdidas para diferentes valores de la RE

| Relación de expansión (RE) | Coeficiente de pérdidas |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1.5 | 0.29 |
| 2 | 0.56 |
| 2.5 | 0.71 |
| 3 | 0.79 |
| 4 | 0.88 |

El coeficiente de pérdidas se calcula para diferentes valores del número de Reynolds con una $RE = 2$ y mediante las simulaciones se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4.7. El número de Reynolds se ajusta variando la velocidad de entrada y manteniendo todos los demás parámetros constantes.

Tabla 4.7: Coeficiente de pérdidas para valores de Reynolds, con $RE = 2$

| Número de Reynolds | Coeficiente de pérdidas |
|--------------------|-------------------------|
| 800 | 0.480 |
| 1500 | 0.562 |
| 3000 | 0.594 |
| 5000 | 0.586 |
| 10000 | 0.5782 |
| 20000 | 0.5687 |
| 40000 | 0.5535 |

Cuando el flujo es laminar ($Re < 1000$), las partículas de fluido permanecen unidas a la pared y el flujo no se separa. Por lo tanto, en estos casos la pérdida de energía y la disminución de la presión son insignificantes. A medida que el número de Reynolds aumenta, el flujo se vuelve turbulento y se produce la separación del flujo, lo que provoca un aumento del coeficiente de pérdidas. Una vez que el flujo se vuelve turbulento ($Re > 1000$), sucesivos incrementos del número de Reynolds no modifican

significativamente el valor del coeficiente de pérdidas. Por esta razón, en flujos turbulentos se considera que el coeficiente de pérdidas de carga en la expansión brusca solo depende de la razón de expansión geométrica.

4.2 Planteamiento de casos para la parte de simulación

El objetivo de esta parte de la práctica es la determinación del coeficiente de pérdidas de carga de una expansión brusca, y la comprobación de la influencia que tiene sobre el mismo los fenómenos de separación y recirculación. Para lograr cumplir estos objetivos se deben analizar los siguientes casos.

Caso 1

En una fábrica se necesita conocer cómo influyen las propiedades del flujo en las pérdidas de carga que ocasiona una expansión brusca en una tubería. Estudie este fenómeno a través del análisis de los resultados de las simulaciones CFD realizadas. Debe ejecutar el programa para aire con diferentes velocidades (al menos 5 velocidades), manteniendo el resto de parámetros constantes. Preste especial atención a disponer de números de Reynolds menores de 2300 (flujo laminar), en el rango 1000 - 1800 y valores mayores de 4000. Analice en cada caso el número de Reynolds, el comportamiento de las líneas de corriente y de los vectores de velocidad, así como, del coeficiente de pérdidas.

Caso 2

Para continuar con el estudio de la expansión brusca, el director de la empresa le solicita que compruebe si es posible realizar experimentos en una expansión brusca con agua en lugar de aire. Usted debe comprobar si el comportamiento cinemático del flujo es el mismo para diferentes fluidos con el mismo número de Reynolds. Para esto, debe ejecutar el programa con agua, modificando la velocidad hasta lograr que el número de Reynolds sea igual a alguno de los seleccionados en el caso anterior para aire. Analice cuidadosamente los gráficos de líneas de corriente obtenidos, así como los perfiles de velocidad en las diferentes zonas.

4.3 Cuestiones

Las respuestas a las cuestiones que se plantean a continuación deben justificarse con los resultados de las simulaciones realizados en la práctica.

¿Cómo influye la velocidad, la densidad y la viscosidad en el número de Reynolds?, ¿Cómo influye el Re en las líneas de corriente, los vectores y los perfiles de velocidad? ¿Cómo influye el número de Reynolds en el coeficiente de pérdidas?

¿Qué diferencia se observa en los resultados obtenidos cuando el Re es laminar y turbulento?

¿Cómo se comporta el flujo desde el punto de vista cinemático para diferentes fluidos con igualdad en el número de Reynolds?

Se quiere utilizar una tubería con una expansión brusca para un fluido con el doble de la densidad del fluido original, pero manteniendo el mismo valor de

pérdidas de energía, ¿a qué velocidad debe moverse el fluido respecto al fluido original?

5. Orientaciones generales para la solución de los tutoriales académicos CFD en ANSYS Workbench

Pasos a seguir para abrir el tutorial:

1. Lanzamiento del espacio de trabajo Workbench
 - a. Haga clic en el menú de inicio
 - b. Ir a Todos los programas > ANSYS 16.2 > Workbench
2. Ir al menú “Studies” en Workbench de manera que se muestren los nombres de los tutoriales disponibles.
3. Haga clic en el nombre del tutorial que desee resolver para que aparezca la interfaz gráfica de usuario (IGU) de tutorial.

La interfaz gráfica de usuario (IGU) posee 7 pestañas de encabezamiento. Las pestañas se denominan: **Overview, Geometry, Physics, Boundary Condition, Mesh, Solve** y **Report**. En general, la solución al problema progresará desde la izquierda a derecha.

Cada pestaña está señalizada con un encabezamiento en la parte superior del tutorial. La información general sobre cada una de las pestañas disponibles es la siguiente:

1. **Overview:** Esta pestaña ofrece una visión general del problema, incluyendo la información de entrada y salida. Es recomendable estudiar esta visión general antes de resolver el tutorial. El usuario puede obtener más información sobre el ejercicio haciendo clic en el botón **Open Document**. Con esta acción se abre un “Documento” (un archivo PDF) que está disponible para cada tutorial. Junto con el enunciado del problema, el documento introductorio también contiene una comparación de los resultados de las simulaciones con los resultados teóricos.

2. **Geometry:** En esta pestaña se introducen todos los parámetros geométricos de entrada. El Modelador de diseño de ANSYS (DM) utiliza estos valores de entrada para crear la geometría en un segundo plano. Los límites de los valores de los parámetros geométricos se dan en el apartado **Overview**.

3. **Physics:** En esta pestaña el usuario puede cambiar el material y sus propiedades. Los valores mínimos y máximos permitidos de las propiedades se dan en la sección **Overview**. Estos valores límite también se enumeran en el “Documento”.

4. **Boundary Conditions:** En esta pestaña el usuario tiene acceso a las diferentes condiciones de contorno disponibles para resolver el problema (**Viscous Condition = Laminar o Turbulent, Velocity y Wall Roughness**). El número de Reynolds se determina para cada condición de velocidad haciendo clic en **Compute**. La rugosidad de la pared solo aparece para flujo turbulento.

5. **Mesh:** En esta pestaña el usuario tiene la opción de seleccionar el tipo de malla. En la lista desplegable sobre la densidad de malla están disponibles tres opciones de malla **Coarse, Medium and Fine** (gruesa, media y fina). Lo primero que se debe hacer en esta pestaña es dar la ruta para el directorio de trabajo, junto con el nombre del proyecto. Cuando el usuario hace clic en el botón **Generate**, el Modelador de mallado de ANSYS (M) accederá a la geometría del Modelador de diseño de ANSYS para hacer la malla. El usuario puede ver la geometría y la malla en ANSYS MD & ANSYS M haciendo clic en el botón **View Geometry y View Mesh** respectivamente, que se activan después de hacer clic en el botón **Generate**. Más abajo en el apartado “Archivos generados” se da información adicional acerca de los archivos ubicados en el directorio de trabajo y sobre los ficheros de datos generados.

6. **Solve:** En esta pestaña se dan los valores de entrada de los parámetros para la solución numérica. Se recomienda no modificar estos parámetros. Número máximo de iteraciones (**Number of Iterations = 10000**), límites de convergencia (**Convergence limits = 1e-5**), etc. El solucionador ANSYS CFD Académico accederá a estos valores de entrada para la iteración. Al hacer clic en el botón **Iterate**, se activará una ventana de Residuos en la que se muestra el progreso de la convergencia de la solución.

7. **Report:** En esta pestaña se muestran los datos de salida obtenidos en la simulación. Si no visualiza esta pestaña pinche en la flecha hacia la derecha que está en la parte superior derecha de la pantalla del tutorial. Además, el usuario puede ver todos los resultados de salida junto con las gráficas en un solo archivo que se genera haciendo clic en el botón **View Reports**. El Informe contiene todas las gráficas relevantes y los datos de salida seleccionados en formato tabular. Para cualquier operación de procesamiento de datos adicionales sobre el problema, el usuario puede abrir el ANSYS CFD-Post haciendo clic en el botón **Open CFDPos**.

El usuario puede acceder al proyecto guardado y a todos los archivos relevantes yendo al directorio de trabajo que se ha especificado en la pestaña **Mesh**.

Archivos generados

Suponga que el usuario desea guardar el proyecto bajo el nombre Expansion en el directorio de trabajo “D:\Temp\Flow Through an Expansion”. En la pestaña **Mesh** puede dar el Directorio de trabajo haciendo clic en el botón **Browse** y seleccionando la carpeta “Temp\ Flow Through an Expansion” en el disco “D:” como se muestra en la Fig. 5.1. (Nota: El valor predeterminado del Directorio de trabajo se da como “C:\Temp”, si el usuario no especifica el directorio de trabajo, todos los archivos del proyecto se guardan en este directorio predeterminado.)

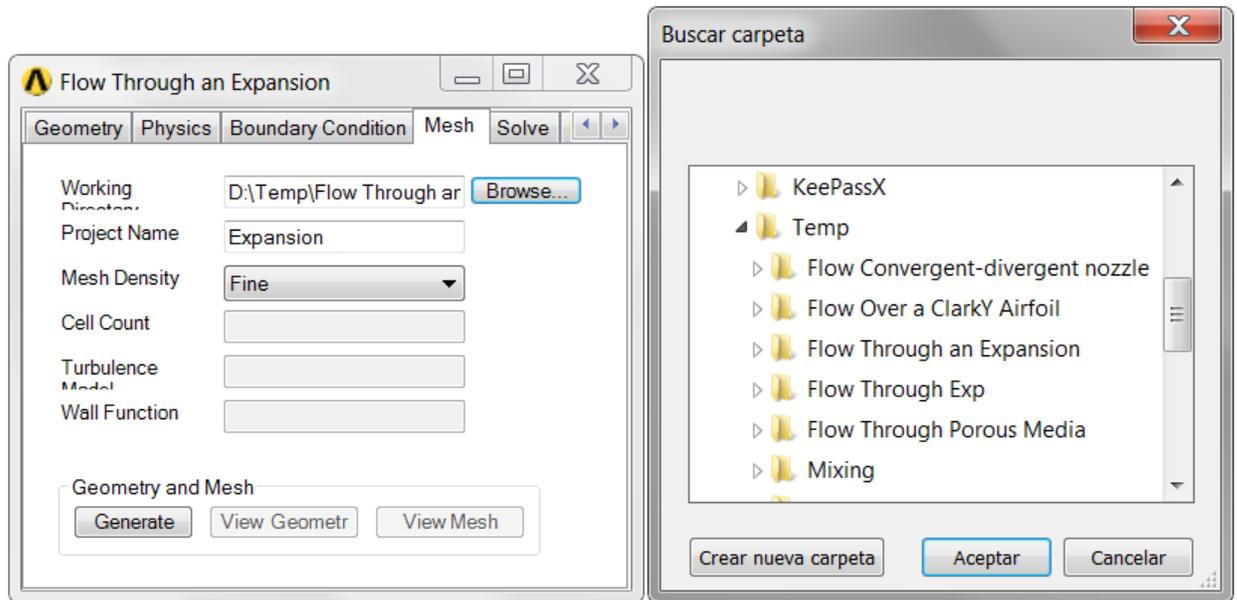


Figura 5.1. Selección de la carpeta de trabajo

Después de hacer clic en el botón **Generate** de la pestaña **Mesh**, los archivos generados por ANSYS CFD Académico en la carpeta "Temp" son Expansion.wbpj y la carpeta "Expansion_files" como se muestra en la Fig. 5.2.

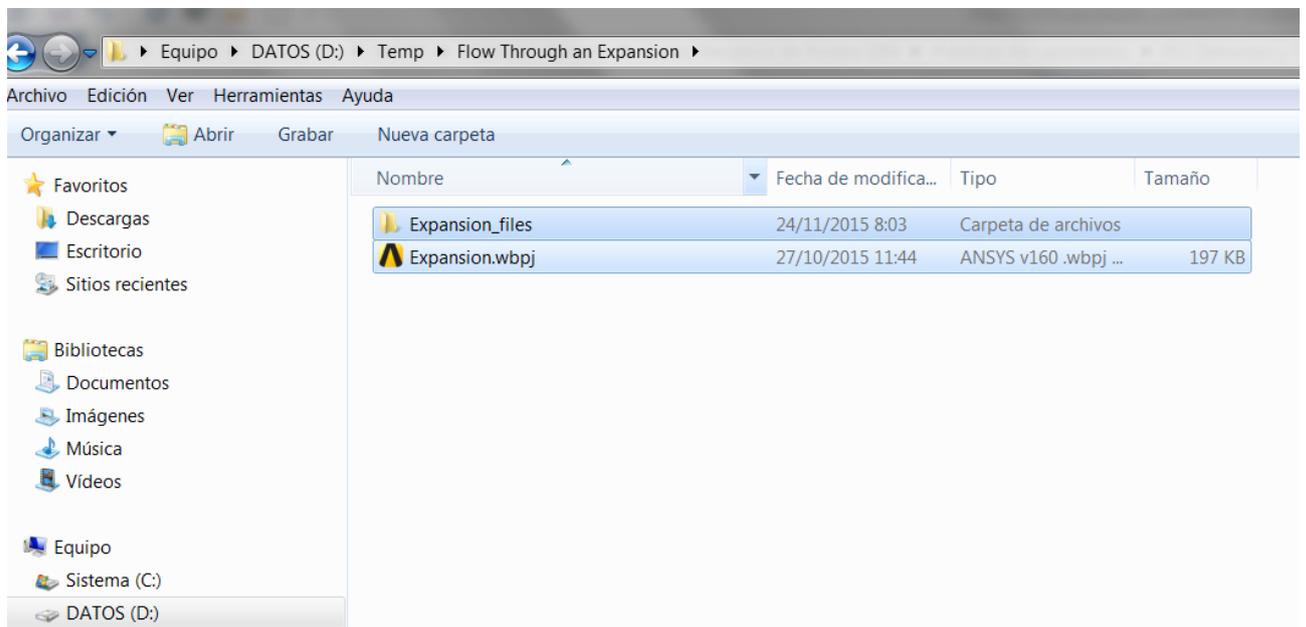


Figura 5.2. Ficheros generados por ANSYS Academic CFD

Nota: Los datos que se leen y escriben por ANSYS CFD académico mientras se ejecuta el tutorial en Workbench se guardan en varios archivos dentro de la carpeta "Expansion_files" como se muestran en la Fig. 5.3.

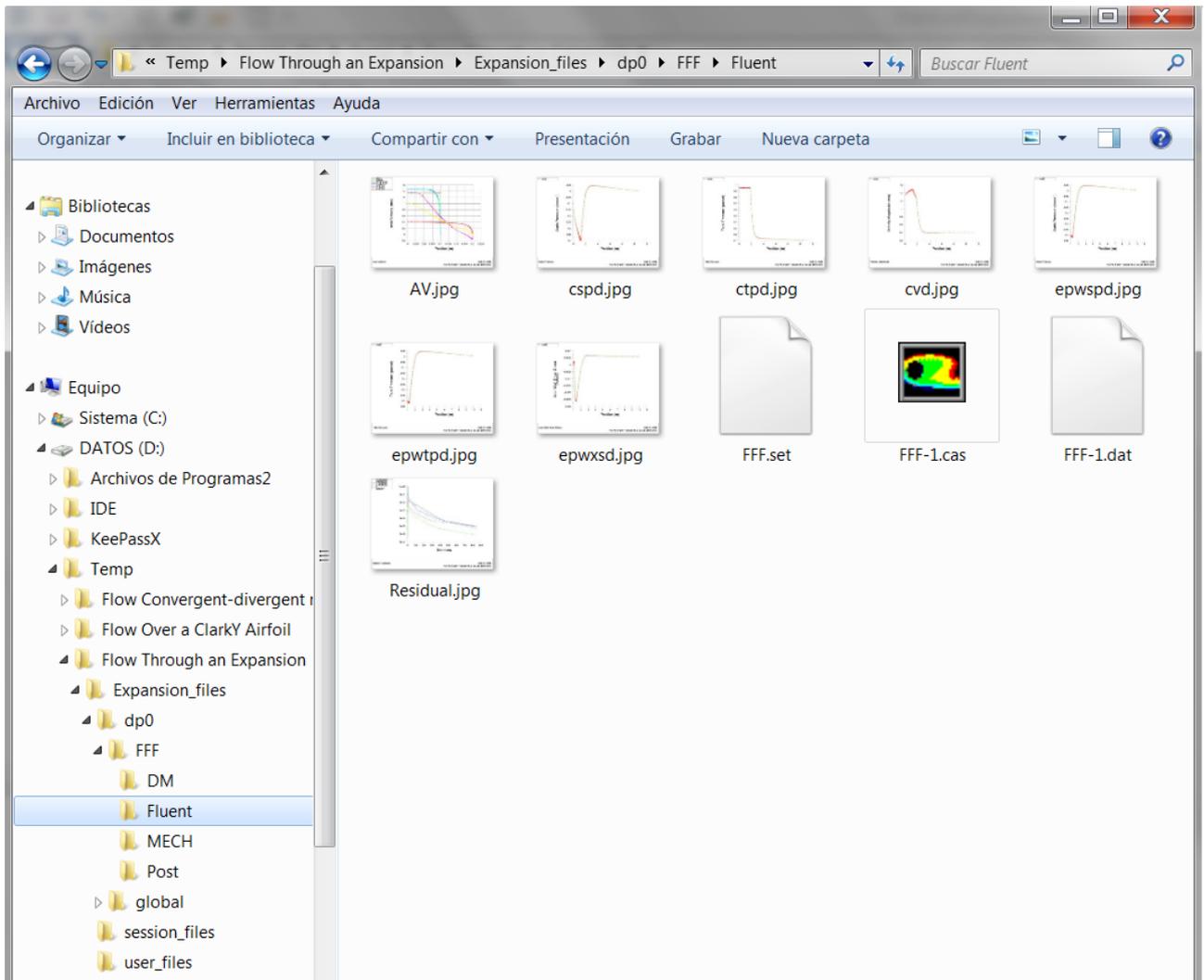


Figura 5.3. Estructura de directorios de ANSYS CFD académico basado en proyectos en Workbench

Los ficheros son los siguientes:

- 1) WorkBench (.wbpj) Project file: 

Este archivo es utilizado por el programa para abrir el proyecto en el entorno del Workbench.

- 2) Setting (.set) file: 

El archivo de configuración contiene los datos que se utiliza para iniciar la simulación desde el principio. La ubicación del archivo .set es:

“Working directory>Project Name_files>dp0>FFF>Fluent”

- 3) Case (.cas) file: 

El archivo del caso se utiliza para representar la geometría, malla y condiciones de contorno. El solucionador utiliza este archivo para cargar la geometría de malla. La ubicación del archivo .cas es:

“Working directory>Project Name_files>dp0>FFF>Fluent”

- 4) Data (.dat) file: 

El archivo de datos contiene los datos de la solución asociados con la celda de soluciones que resulta de ejecutar el tutorial. ANSYS CFD Académico utiliza este archivo para reiniciar la simulación a partir de datos existentes. La ubicación del archivo .dat es:

“Working directory>Project Name_files>dp0>FFF>Fluent”

- 5) Archivos .jpg

Estos son los archivos con las imágenes de las Figuras generadas en el tutorial.

El tutorial genera en la ventana Workbench un cuadro de pasos que es el componente del sistema de análisis, que el usuario puede ver en la entorno del WorkBench. (Ver figura 5.4).

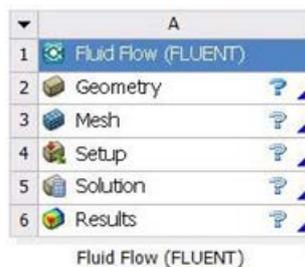


Figura 5.4. Sistema de análisis del proyecto

A través de este recuadro se puede acceder a cada uno de los programas utilizados en la solución del proyecto, pero esto requiere un estudio más profundo del programa ANSYS, que está fuera de los objetivos de las prácticas de laboratorio de este curso.

ANEXO 2: Práctica de laboratorio.

Ensayos aerodinámicos en un túnel de viento

Guion de práctica de laboratorio de la asignatura Mecánica de Fluidos acerca de ensayos aerodinámicos a escala reducida en un túnel de viento

1. Objetivos

- a) Familiarizarse con los conceptos de fuerzas de arrastre y sustentación
- b) Comparar los resultados experimentales con los obtenidos a través de simulaciones computacionales
- c) Emplear la teoría de análisis dimensional para el diseño de experimentos y para trasladar los resultados de un modelo al prototipo real

2. Introducción

Esta práctica de laboratorio está dedicada al estudio de los coeficientes de arrastre y sustentación para diferentes cuerpos sólidos inmersos en un flujo externo.

Cuando el fluido circula alrededor de una superficie sólida, se habla de flujo externo y se considera que el flujo no está confinado. El interés principal en este tipo de flujos consiste en determinar las fuerzas que se originan sobre las superficies sólidas en el seno de la corriente.

El flujo externo aparece en numerosos fenómenos y aplicaciones de la ingeniería, como por ejemplo, cuando el viento sopla sobre los árboles, edificios, todo tipo de aerogeneradores y líneas de transmisión eléctrica, o cuando el mar ejerce sus fuerzas sobre conductos submarinos, pilares de puentes y cualquier otro objeto natural o artificial inmerso en el agua. Por otra parte, cuando un cuerpo sólido se mueve en el seno de un fluido, puede considerarse que el objeto está estático y que es el fluido el que se mueve en sentido contrario con la misma velocidad, como, por ejemplo, el movimiento de las partículas de polvo, de las gotas de aerosol y cualquier otro objeto en el aire, así como, el movimiento de las aeronaves, los automóviles, barcos y submarinos.

El cálculo teórico de las fuerzas que se producen sobre los objetos inmersos en flujos externos es tanto más complejo cuanto más complicada es la geometría del objeto, por lo que frecuentemente se recurre a la experimentación para evaluar estas fuerzas. Las instalaciones experimentales donde se determinan las fuerzas de arrastre y sustentación se denominan túneles aerodinámicos o hidrodinámicos, dependiendo de si es aire o agua el fluido de trabajo. El estudio experimental en túneles aerodinámicos de cuerpos de grandes dimensiones (como por ejemplo, aviones,

edificios, barcos, etc.) o de cuerpos relativamente pequeños (como, por ejemplo, las partículas de polvo, o las gotas de agua) suele tener costes prohibitivos, así que, la mayoría de las veces los estudios se realizan sobre modelos a escala semejantes a los prototipos reales, pero más manejables. Estos argumentos ponen de relieve el estrecho vínculo que existe entre la experimentación del flujo externo en túneles y el análisis dimensional y la teoría de semejanza de modelos.

Muchos fenómenos naturales y tecnologías de la ingeniería están relacionados con el tema del flujo externo. Al concluir esta práctica se podrán responder muchas preguntas. ¿Por qué los árboles se inclinan ante ráfagas de viento fuertes? ¿A qué se debe la forma que adoptan las ramas y las hojas de los árboles cuando sopla el viento? ¿Cómo es posible que los aviones con un peso tan grande puedan despegar y volar a cierta altura? ¿Qué debe garantizar la aerodinámica de un coche de Fórmula 1? ¿Por qué razón los ciclistas marchan en el pelotón durante la mayor parte de la carrera?

3. Fundamentación teórica

El *arrastre* y la *sustentación* se definen como las componentes de la fuerza ejercida sobre un cuerpo por el fluido en movimiento en las direcciones paralela y normal, respectivamente, a la velocidad del fluido relativa al cuerpo. Estas fuerzas son debidas a los esfuerzos viscosos y de presión sobre la superficie del cuerpo.

Tanto el arrastre como la sustentación tienen dos componentes: una que se origina por las diferencias de presión, denominada *de presión* o *de forma*, y la otra que resulta de los esfuerzos cortantes llamada *de superficie* o *viscosa*.

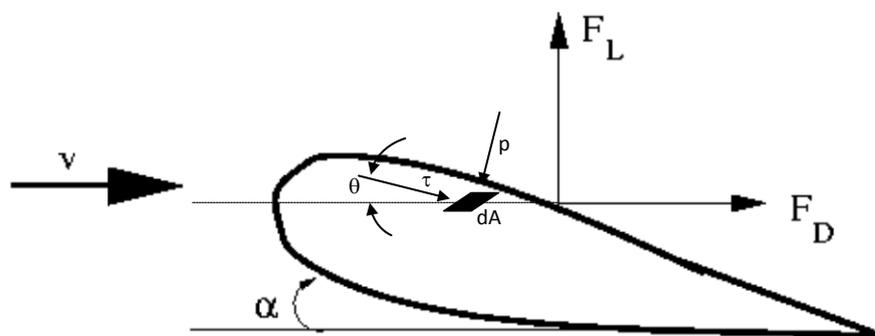


Figura 3.1. Fuerzas existentes en un perfil aerodinámico inmerso en una corriente libre

3.1 Fuerza y coeficiente de arrastre

La fuerza de arrastre es la componente de la fuerza en la dirección de la velocidad incidente. A partir de esta fuerza se define un coeficiente de arrastre adimensional:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, que para el túnel de viento se puede considerar ($\rho_{aire} = 1.2 \text{ kg/m}^3$), V su velocidad y A es el área en planta del perfil, es decir, $A = cb$ (ver Figura 3.2).

En general el coeficiente de arrastre depende de la geometría del cuerpo y del número de Reynolds para flujos incompresibles. El número de Reynolds se define como

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (3.2)$$

Siendo D una longitud característica del cuerpo (por ejemplo, para un perfil alar es la cuerda), μ es la viscosidad del fluido y ν es la viscosidad cinemática. Para el túnel de viento se puede considerar ($\mu_{aire} = 1.8 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$) y ($\nu_{aire} = 1.5 \times 10^{-5} m^2/s$).

3.2 Fuerza y coeficiente de sustentación

La fuerza de sustentación es la componente de la fuerza ejercida por la corriente sobre el cuerpo, en la dirección perpendicular a la velocidad. En la instalación del laboratorio coincide con la componente vertical. Asociada a esta fuerza se define un coeficiente adimensional de sustentación, similar al de arrastre,

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (3.3)$$

El coeficiente de sustentación también depende de la geometría del cuerpo y del número de Reynolds para flujo incompresible. La dependencia con el número de Reynolds es similar a la que se establece para el coeficiente de arrastre. La geometría es un factor muy importante en la sustentación. El ángulo de ataque (α) y las dimensiones características en un perfil aerodinámico se muestran en la Figura 3.2.

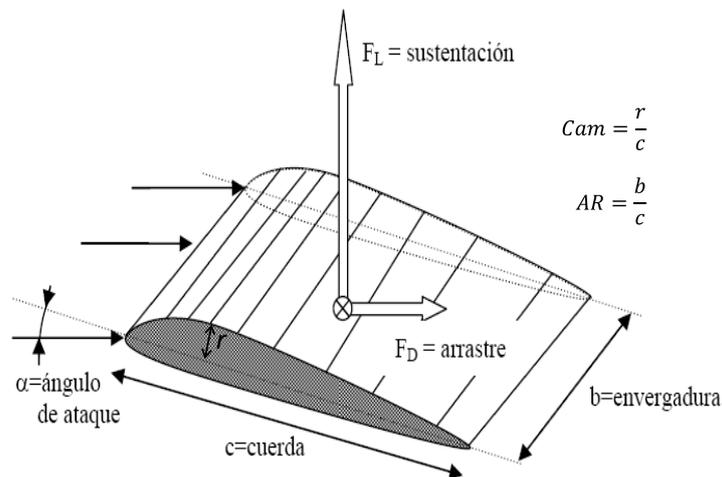
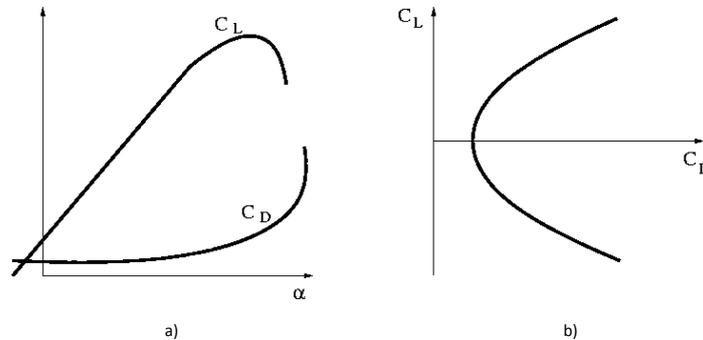


Figura 3.2. Perfil aerodinámico. El parámetro Cam es la relación entre la curvatura y la cuerda del perfil, mientras que AR es la relación de forma del perfil

Al estudiar perfiles aerodinámicos se comprueba que la fuerza de sustentación depende fuertemente del ángulo de ataque y que esta fuerza es mayor que la de resistencia para ángulos pequeños. En la Figura 3.3 se muestran las curvas típicas de un perfil aerodinámico a modo de ilustración. En primer lugar la variación de los coeficientes de arrastre y sustentación en función del ángulo de ataque (Figura 3.3a) y

después la variación del coeficiente de sustentación en función del de arrastre. Esta curva de C_L en función de C_D recibe el nombre de polar del perfil aerodinámico (Figura 3.3b).



a) Comportamiento con el ángulo de ataque b) polar el perfil aerodinámico

Figura 3.3. Curvas características de un perfil aerodinámico

El coeficiente de sustentación aumenta de forma aproximadamente lineal con el ángulo de ataque hasta que se produce la llamada *pérdida*, momento en el que disminuye bruscamente. Note que los perfiles, como por ejemplo el de las alas de avión, no son simétricos y presentan curvaturas, lo que produce sustentación a ángulo de ataque cero. Para ángulos de ataque superiores al valor de pérdida, ambos coeficientes, el de arrastre y el de sustentación, adquieren valores similares. El ángulo en el que se produce la pérdida depende de la forma del perfil y del número de Reynolds, pero generalmente está cercano a los 15 grados.

3.3 Tubo de Pitot

El tubo de Pitot es un instrumento sencillo, útil y muy utilizado para medir velocidades. La ecuación que relaciona la velocidad con la diferencia de presión en un tubo de Pitot se obtiene al aplicar la ecuación de Bernoulli a una línea de corriente, bajo las hipótesis de flujo estacionario, incompresible, no viscoso, isoterma (sin transferencia de calor) y sin transferencia de potencia. La ecuación de Bernoulli establece que:

$$P + \rho \frac{u^2}{2} + \rho g z = \text{cte} \quad (3.4)$$

Aunque la ecuación de Bernoulli es estrictamente válida sólo en flujos de fluido ideal, para muchos flujos reales constituye una buena aproximación.

Básicamente, el tubo de Pitot consiste en dos tubos concéntricos en forma de "L", independientes y estancos (ver figuras 3.4 y 3.5). El tubo central posee un solo orificio, que se enfrenta a la corriente fluida que se desea medir. El tubo externo, que envuelve al tubo interior, tiene una serie de orificios practicados en forma de corona anular a una cierta distancia de la punta. La distancia entre los orificios y el extremo

del tubo ha de ser alrededor de 10 a 12 veces el diámetro del extremo del tubo. En general, los equipos de laboratorio tienen una longitud de 20 o 30 mm y un diámetro de 2 mm. Los dos tubos concéntricos se prolongan una cierta distancia para poder conectar sus extremos de salida con un manómetro diferencial.



Figura 3.4. Fotografía del tubo de Pitot

La correcta aplicación de la ecuación de Bernoulli al tubo de Pitot, se basa en la Figura 3.5, donde se muestra un corte transversal de la sonda. Se supone que sobre el tubo incide una corriente uniforme de velocidad u_∞ y presión P_∞ . El subíndice ∞ indica un punto *lejos del tubo*, pero en la práctica, dependiendo de la complejidad del flujo, la distancia entre el punto alejado y la punta del tubo de Pitot puede ser del orden de unos cuantos centímetros.

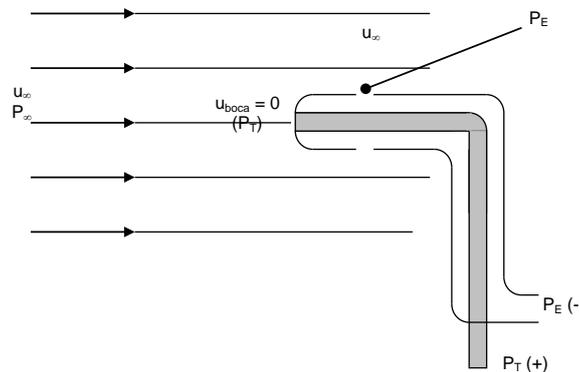


Figura 3.5. Representación esquemática de un tubo de Pitot

Aplicando Bernoulli entre el punto alejado, “ ∞ ”, y un punto en la boca del tubo (punto de remanso), a lo largo de una línea de corriente, se obtiene,

$$P_\infty + \rho \frac{u_\infty^2}{2} + \rho g z_\infty = P_{boca} + \rho \frac{u_{boca}^2}{2} + \rho g z_{boca} \quad (3.5)$$

Teniendo en cuenta que se trata de un flujo de gas donde los cambios de energía potencial son despreciables, y que en la boca existe un punto de remanso ($u_{boca} = 0$),

$$P_{boca} = P_\infty + \rho \frac{u_\infty^2}{2} = P_T \quad (3.6)$$

De manera que, la presión en la boca del tubo es la suma de la presión aguas arriba y del término cinético en forma de presión también aguas arriba del tubo de

Pitot (en el flujo no perturbado por la presencia del tubo); tal suma se denomina a menudo *presión total*, P_T .

Cerca de los orificios laterales el aire recupera la velocidad u_∞ y la presión que detecta la corona de estos orificios anulares en el tubo exterior (ver Figura 3.5) es prácticamente la presión en el flujo no perturbado, P_∞ . Esta presión se denomina *presión estática* $P_E = P_\infty$.

De esta forma, al medir la diferencia de presión entre las dos salidas del tubo de Pitot, a través de un manómetro diferencial, se obtiene:

$$P_T - P_E = \left(P_\infty + \rho \frac{u_\infty^2}{2} \right) - P_\infty = \rho \frac{u_\infty^2}{2} = P_D \quad (3.7)$$

Este término se denomina *presión dinámica*, P_D .

Así, es posible determinar la velocidad u_∞ midiendo únicamente la diferencia de presión ($P_D = P_T - P_E$), y despejando en la ecuación (3.7),

$$u = u_\infty = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.8)$$

Donde ΔP es la diferencia de presión medida en el tubo de Pitot y ρ es la densidad del aire.

Nota: Una de las suposiciones de partida para llegar a la ecuación (3.8), ha sido que el tubo de Pitot esté alineado con la corriente. Éste es un requisito muy importante para que la medida sea precisa. En caso contrario, es decir, si el tubo de Pitot no está alineado con la corriente, las presiones medidas no son necesariamente P_T y P_E , y su diferencia no será la presión dinámica P_D .

Para realizar correctamente la medida, debe anotarse la longitud que sube el líquido manométrico l en el manómetro diferencial respecto a la marca inicial (sin flujo). Así puede determinarse la diferencia entre la presión total y la presión estática, ΔP , y después la velocidad a través de la ecuación (3.8).

El tubo del manómetro diferencial está inclinado para lograr una mayor precisión de la medida, como se muestra en la Figura 3.6.

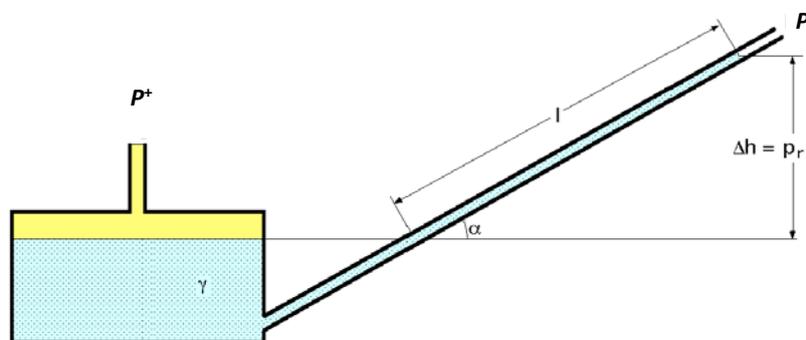


Figura 3.6. Manómetro diferencial de tubo inclinado

La rama de mayor presión debe conectarse al tubo marcado como P^+ en el manómetro, mientras que la de menor presión debe acoplarse con el tubo marcado como P^- . La diferencia de presión se determina como,

$$\Delta P = P^+ - P^- = P_T - P_E = P_D = \gamma_{LM} \Delta h = \gamma_{LM} \text{sen}(\alpha) \Delta l \quad (3.9)$$

Donde γ_{LM} es el peso específico del líquido manométrico y α es el ángulo de inclinación de la columna manométrica.

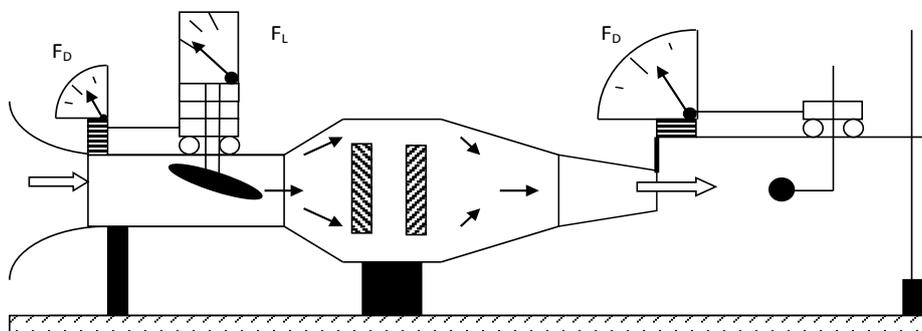
En algunos instrumentos comerciales no es necesario medir el ángulo y calcular su seno para aplicar la ecuación (3.9), pues el fabricante proporciona una tabla de conversión entre la longitud y la presión. El micromanómetro que se emplea en el laboratorio, muestra directamente el incremento de la presión, en Pascales, que corresponde a un milímetro de su escala.

4. Descripción de la instalación

El túnel de viento que se utiliza en esta práctica presenta una boca de entrada cuadrada que se estrecha, una sección recta (zona de pruebas a la que puede acoplarse un suelo plano), un ventilador accionado por motor, y una tobera de salida (ver Figura 4.1). La velocidad del ventilador, y por tanto la del flujo, se puede variar por medio de un potenciómetro.



a)



b)

Figura 4.1. a) Fotografía y ubicación del túnel de viento. b) Esquema del túnel de viento para la determinación de las fuerzas de arrastre y sustentación

Para medir la fuerza de arrastre (F_D) se utiliza un dinamómetro de torsión. El dinamómetro de muelle cubierto por metacrilato, localizado sobre un carrito de plástico, donde se cuelgan los cuerpos, sirve para medir la fuerza de sustentación (F_L).

Se dispone de dos perfiles aerodinámicos (alas) y de un conjunto de cuerpos: esferas de diferente diámetro y rugosidad, semiesfera hueca y cuerpo fuselado. Para calcular el número de Reynolds y los coeficientes de arrastre y sustentación se necesita el área de los cuerpos, así que, no olvide medir los valores que permitan determinar el área frontal o el área en planta según la aplicación.

Modo de operación

Se puede utilizar el túnel de viento con dos objetivos diferentes: evaluar la fuerza de arrastre (resistencia aerodinámica de los cuerpos) y confeccionar las curvas características de un perfil (evaluar fuerzas de arrastre y de sustentación). A continuación se describe el procedimiento para realizar este experimento.

Curvas características de un perfil de ala de avión:

- a) Tomar el dinamómetro para medir fuerzas de resistencia (tiene forma de sector semicircular) e instalarlo encima del túnel en la parte izquierda insertando las dos varillas en los dos orificios destinados para ello
- b) Tomar el dinamómetro para medir fuerzas de sustentación (metacrilato) y colocarlo sobre el carrito de plástico, insertando los vástagos metálicos en los orificios correspondientes
- c) Colocar el carrito, con el dinamómetro de metacrilato encima, en el carril sobre el túnel (ver Figura 4.2). Comprobar que se puede mover sin apenas rozamiento
- d) Desmontar el fondo del túnel con los 4 tornillos que hay en los extremos de su parte inferior
- e) Introducir el perfil de ala de avión con las varillas metálicas hacia arriba y la parte más ancha del perfil a la izquierda de la parte más fina
- f) Atravesar con las varillas el techo del túnel
- g) Introducir las varillas por los orificios del carrito
- h) Introducir las varillas por los orificios del dinamómetro de metacrilato
- i) Ajustar con los tornillos laterales del dinamómetro de metacrilato las varillas para que estas queden sujetas, de forma que ambas varillas enrasen con una línea horizontal que marca ángulo de ataque cero en el dinamómetro de metacrilato
- j) Volver a colocar el fondo
- k) Coger la cuerda que sale del tambor del dinamómetro para medir fuerzas de arrastre y sujetarla en el gancho del carrito
- l) Poner en marcha el ventilador

- m) Con el potenciómetro elegir la velocidad máxima
- n) Esperar a que se estabilice el flujo
- o) Tomar nota de los valores de las dos fuerzas que indican los dinamómetros
- p) Repetir desde el punto d) dejando fija la varilla de la derecha del perfil alar y variando la posición de la varilla izquierda de forma que recorra los ángulos de ataque desde 0° hasta 14° (incrementando de 2 en 2°).

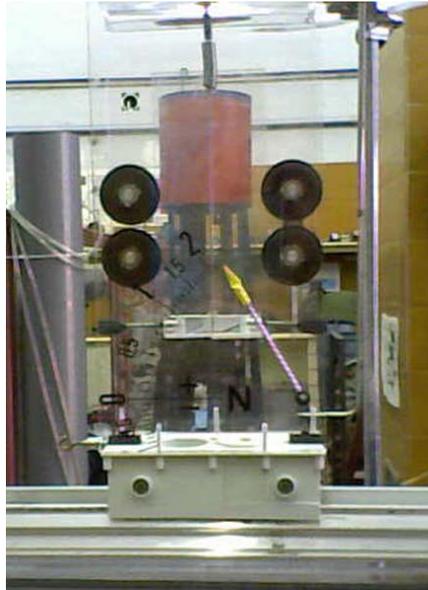


Figura 4.2. Carrito de metacrilato para medir la fuerza de sustentación de un perfil alar

5. Simulación CFD del flujo sobre una superficie de sustentación

En este ejercicio se modela el flujo sobre una superficie de sustentación ClarkY. Se supone flujo bidimensional. La longitud de la cuerda del perfil aerodinámico es 0.4036 m. Están disponibles los tipos de malla gruesa, media y fina. Sobre la superficie de sustentación se puede simular tanto un campo de flujo no viscoso como uno viscoso. Las propiedades materiales del aire se utilizan asumiendo comportamiento de gas ideal para los cálculos de densidad. La temperatura, la presión y el número de Mach en el campo lejano (alejado del perfil), así como el ángulo de ataque se pueden especificar en las condiciones de contorno. En el informe se determina el esfuerzo cortante en la pared, el factor de fricción en la superficie, el coeficiente de sustentación, y el coeficiente de fricción. Están disponibles gráficas del coeficiente de presión, del coeficiente de fricción, y de la distribución del esfuerzo cortante. Además, se pueden mostrar los contornos de presión, velocidad, temperatura, función de corriente, la energía cinética turbulenta y la razón de disipación. También se puede visualizar una figura con los vectores de velocidad.

Introducción

Un problema fundamental, común y de importancia práctica en aerodinámica es el flujo sobre una superficie de sustentación. Las superficies de sustentación son representaciones bidimensionales de las alas tridimensionales. Las superficies de

sustentación bidimensionales se pueden considerar como los componentes básicos de un ala, lo que significa que las características aerodinámicas de los perfiles de sustentación son útiles para interpretar el rendimiento del ala completa. En este ejercicio, se investigan tanto los flujos no viscosos como los viscosos sobre un perfil aerodinámico. Las características de sustentación y el arrastre de la superficie de sustentación ClarkY, así como la variación de la sustentación con el ángulo de ataque pueden ser evaluadas. También pueden compararse la distribución de presión para campos de flujo viscosos y no viscosos, de modo que los efectos de la viscosidad pueden ser interpretados.

Detalles de modelación

La región de flujo se representa en dos dimensiones (2D). El procedimiento para resolver el problema es:

1. Crear la geometría.
2. Establecer las propiedades del material y las condiciones de contorno.
3. Mallar el dominio.

Todas las operaciones se llevan a cabo en el entorno ANSYS WorkBench (WB). Para facilitar el uso, los productos de ANSYS individuales se ejecutan en segundo plano, y el usuario sólo ve el entorno WB. Esto se ha logrado con la personalización del ambiente de trabajo del WB. Por lo tanto, la geometría y la malla se crean en ANSYS DesignModeler (DM) y ANSYS Meshing, respectivamente, en segundo plano. La malla se exporta al ANSYS CFD Software Académico. Las condiciones de contorno y las propiedades del flujo se establecen a través de archivos de comandos parametrizados. ANSYS Academic CFD continúa resolviendo el problema hasta que el límite de convergencia se satisface o se alcanza el número de iteraciones especificado.

Para iniciar el tutorial debe seguir los siguientes pasos:

1. Lanzamiento del espacio de trabajo Workbench
 - a. Haga clic en el menú de inicio
 - b. Ir a Todos los programas> ANSYS 16.2> Workbench
2. Ir al menú "Studies" en Workbench de manera que se muestren los nombres de los tutoriales disponibles.
3. Haga clic en el nombre del tutorial que desee resolver para que aparezca la interfaz gráfica de usuario (IGU) del tutorial. En este caso debe seleccionar **Flow Over A ClarkY airfoil**. Leer el **Overview** y abrir las indicaciones con **Open Document**.

En la Figura 5.1 se muestra el entorno de trabajo de ANSYS Workbench.

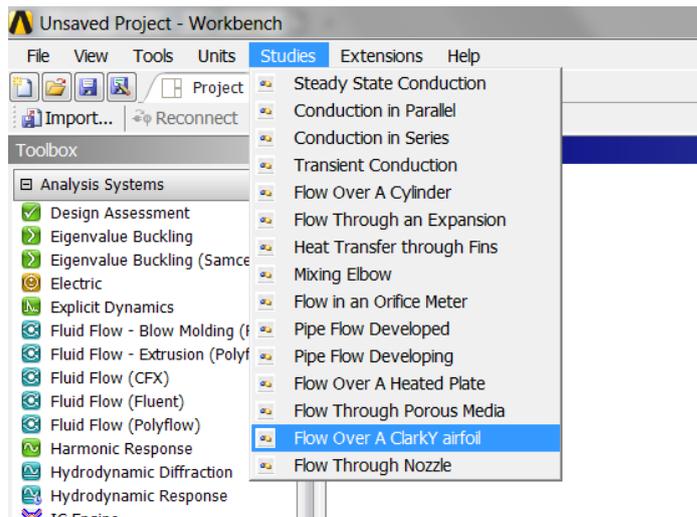


Figura 5.1. Entorno de ANSYS Workbench

La interfaz gráfica de usuario (IGU) posee 7 pestañas de encabezamiento. Las pestañas se denominan: **Overview**, **Geometry**, **Physics**, **Boundary Condition**, **Mesh**, **Solve** y **Report**. En general, la solución al problema progresará desde la izquierda a derecha (Ver figura 5.2).

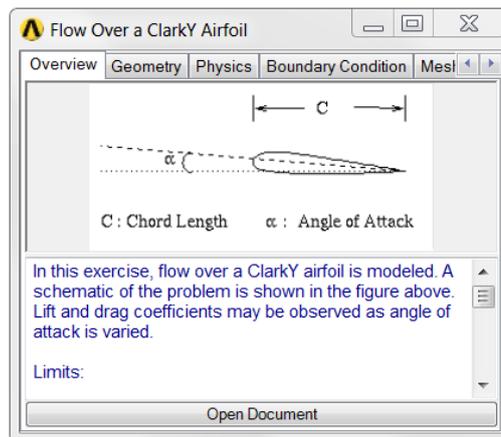


Figura 5.2. Pestañas en cada tutorial

En los siguientes párrafos se explica la forma en que se debe ejecutar el programa tutorial de ANSYS FLUENT, siempre avanzando por las pestañas del menú en la parte superior de izquierda a derecha.

Geometry

El perfil aerodinámico ClarkY se crea a partir de un conjunto de puntos que se conectan mediante una curva suave, creándose la superficie del perfil. Se crea un dominio de flujo que rodea a la superficie de sustentación y este dominio se subdivide a efectos de mallado (ver Figura 5.3). Las siguientes dimensiones se utilizan para el dominio:

- ✓ $W = 10 \text{ m}$
- ✓ $L = 12.5 \text{ m}$
- ✓ $C = 0.4036 \text{ m}$ (donde C es la longitud de la cuerda del perfil)

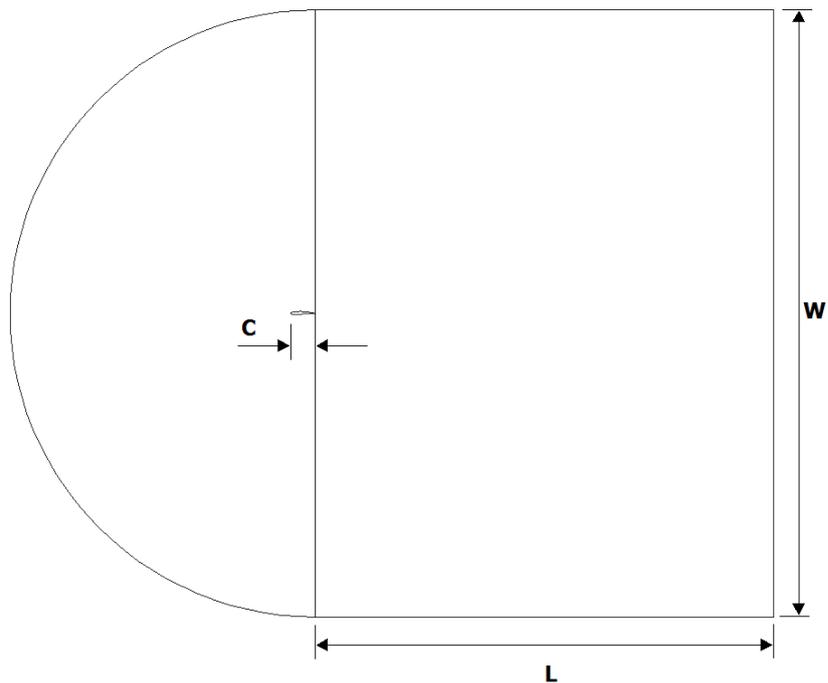


Figura 5.3. Esquema de flujo sobre la superficie de sustentación ClarkY y el dominio de flujo

En esta pantalla no es posible modificar nada, así que se deja el dato de longitud de cuerda establecido.

Physics

Se pueden aplicar tanto modelos de flujo no viscoso como de flujo viscoso. Con base en el número de Reynolds, se aplican los siguientes modelos físicos.

Tabla 5.1: Modelos de turbulencia basados en el número de Reynolds

| Re | Modelos utilizados |
|----------------|----------------------------------------------------------------|
| $Re \leq 5000$ | k-ϵ model (Enhanced Wall Treatment) |
| $Re > 5000$ | k-ϵ model (Standard Wall Treatment) |

En esta pestaña solamente se puede seleccionar si el flujo se considera viscoso o no viscoso. En la primera ejecución del programa seleccione flujo viscoso.

Al seleccionar **Viscous Condition = Viscous**, el modelo adecuado de turbulencia y de pared se aplica automáticamente en función del número de Reynolds que se calcula en la próxima pestaña.

Las siguientes propiedades del fluido se pueden visualizar:

- Densidad (ley del gas ideal)
- Conductividad térmica (sólo para el flujo viscoso)
- Viscosidad (sólo para el flujo viscoso)
- Calor específico
- Peso molecular

Boundary Condition

Puede especificar las siguientes condiciones de contorno:

- Presión en el campo lejano (**Far Field Pressure**)
- Temperatura en el campo lejano (**Far Field Temperature**)
- Número de Mach (**Mach No**)
- Ángulo de ataque (**Angle of Attack**)
- Rugosidad de pared (**Wall Roughness**)

Las siguientes condiciones de contorno se asignan en FLUENT.

Tabla 5.2: Condiciones de contorno asignadas en ANSYS CFD Académico

| Frontera (Boundary) | Asignada como |
|------------------------------|---------------------------|
| Airfoil | Wall |
| External domain | Pressure far-field |

Haciendo clic sobre la tecla **Compute** se determina el número de Reynolds para la condición de velocidad especificada a través del número de Mach.

Para la primera ejecución del programa trabaje con los datos por defecto:

- **Far Field Pressure = 40000 Pa**
- **Far Field Temperature = 250 K**
- **Mach No = 0.03**
- **Angle of Attack = 0**
- **Wall Roughness = 0**

Los parámetros numéricos que pueden ser especificados por el usuario se deben introducir con precaución. Como guía, los valores recomendados mínimos (Min) y máximos (Max) de estos parámetros se muestran en la Tabla 5.3. El uso de un valor fuera del rango recomendado puede provocar problemas de convergencia en la solución.

Tabla 5.3: Límites de los parámetros utilizados en el ejercicio

| Parámetro | Límite | |
|------------------------------------------|--------|--------|
| | Mínimo | Máximo |
| Presión estática en el campo lejano (Pa) | 1000 | - |
| Temperatura en el campo lejano (K) | 50 | - |
| Número de Mach en la corriente libre | - | 0.9 |
| Ángulo de ataque (Deg.) | -5 | 20 |

Meshing

Están disponibles mallas de tipo grueso, medio y fino. La densidad de malla varía en función del factor de refinamiento asignado. Los valores del factor de refinamiento para las densidades de malla se dan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Factor de refinamiento de la malla

| Densidad de la malla | Factor de refinamiento |
|----------------------|------------------------|
| Fina | 1 |
| Media | 1.5 |
| Gruesa | 2.25 |

Debe seleccionar la ubicación de los ficheros del proyecto con la tecla **Browse** y establecer una malla fina y hacer clic sobre la tecla **Generate**. Debe ser paciente en lo que el programa de mallado confecciona la malla.

Los bordes se han mallado usando “**First Cell Height**” y el número calculado de intervalos. Todo el dominio está mallado utilizando un “**Map scheme**”. La malla resultante se muestra en la Figura 5.4.

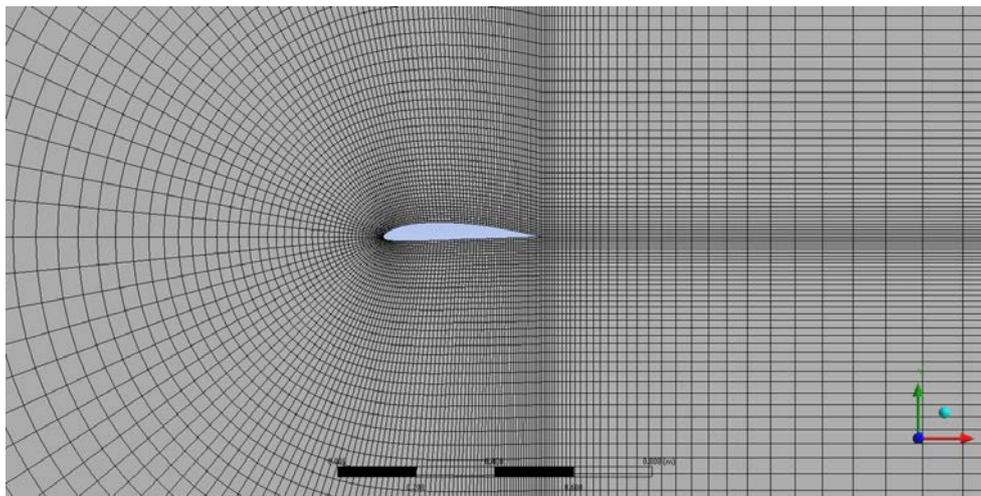


Figura 5.4. Malla generada por ANSYS ACADEMIC CFD

Solve

En esta pestaña solo debe hacer clic sobre **Iterate** y esperar que el programa resuelva el problema.

Los parámetros numéricos que pueden ser especificados por el usuario se deben introducir con precaución. Como guía, los valores recomendados mínimos (Min) y máximos (Max) de estos parámetros se muestran en la Tabla 5.5. El uso de un valor fuera del rango recomendado puede provocar una disminución de exactitud o la imposibilidad de converger a una solución.

Tabla 5.5: Límites de los parámetros utilizados en el ejercicio

| Parámetros | Límites | |
|------------------------|---------|--------|
| | Mínimo | Máximo |
| Número de iteraciones | 1 | - |
| Límite de convergencia | - | 0.01 |

La malla se exporta a ANSYS Academic CFD junto con las propiedades físicas y las condiciones iniciales especificadas. Las propiedades de los materiales, las condiciones iniciales y las instrucciones para el solucionador se proporcionan a través de un archivo de comandos. Una vez que la solución se hace converger o se cumple el número de iteraciones especificados, ANSYS Academic CFD exporta los datos para un archivo .cas y para otro archivo .dat. ANSYS CFD-Post lee el archivo .dat para las actividades de procesamiento posterior.

Report

En esta pestaña solo se pueden visualizar los siguientes parámetros:

- **Wall Shear Stress**
- **Skin Friction Factor**
- **Coefficient of Lift**

También se pueden visualizar los siguientes gráficos en el menú extensible

Plots:

- **Residuals**
- **Pressure Coefficient**
- **Friction Coefficient**
- **Shear Stress Distribution**

Alcance y limitaciones

En los ángulos de ataque más altos se observa una región de separación grande aguas abajo de la superficie de sustentación. Esta región de separación hace que el flujo sea no permanente (no estacionario). Debido a que las funciones dependientes del tiempo para el campo de flujo se desprecian en esta simulación, las predicciones de flujo para los ángulos de ataque mayores no son suficientemente exactas. Este ejercicio tiene como objetivo solamente la resolución de flujos de alta velocidad. No es posible resolver el sistema de flujo para condiciones laminares.

Pueden presentarse dificultades en la obtención de la convergencia o una mala precisión si se utilizan valores de condiciones de contorno fuera de los límites sugeridos en las Tablas 5.3 y 5.5.

Resultados del ejercicio

Un gas ideal con viscosidad μ fluye sobre un perfil aerodinámico ClarkY con número Mach M . El dominio computacional se crea alrededor de la superficie de sustentación ClarkY que tiene longitud de cuerda C . Evaluar las características de

sustentación de la superficie ClarkY, la variación de la sustentación con el ángulo de ataque (α) y la distribución de la presión en la superficie de sustentación.

Resultados del aprendizaje:

- ✓ Para una superficie de sustentación ClarkY con longitud de la cuerda de 0.4036 m, se determina que el ángulo de ataque para el máximo coeficiente de sustentación es de 13°.
- ✓ La distribución de la presión en la superficie del perfil aerodinámico

Cuando el fluido fluye sobre la superficie de sustentación ClarkY actúan las fuerzas de presión y cortante. La componente de la fuerza neta (fuerza cortante y de presión en la pared) que actúa en la dirección del flujo se llama fuerza de arrastre (F_D). La fuerza de arrastre se adimensionaliza mediante la definición de un parámetro que se llama coeficiente de arrastre (ver ecuación 3.1).

La componente de la fuerza neta (fuerza cortante y de presión en la pared) que actúa normal a la dirección del flujo se llama fuerza de sustentación (F_L). La fuerza de sustentación también se adimensionaliza mediante la definición de otro parámetro que se llama coeficiente de sustentación (ver ecuación 3.2).

Las superficies de sustentación deben diseñarse para obtener la sustentación deseada con la mínima resistencia durante el vuelo. La sustentación del perfil aerodinámico depende principalmente de la distribución de presión sobre la superficie, por lo que la forma de la superficie de sustentación es un parámetro muy importante. El objetivo en el ala de un avión es reducir la presión media en la superficie superior y aumentarla en la superficie inferior, de manera que el desequilibrio de presión entre estas superficies cause la mayor sustentación. Por lo general, la distribución de presión sobre la superficie se expresa en términos de coeficiente de presión (C_p). El coeficiente de presión se define como la razón entre la diferencia de presión estática (local menos lejana) y la presión dinámica de la corriente libre.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2} \quad (5.1)$$

Donde,

p = presión estática local

p_∞ = presión estática en la corriente libre

Los resultados que se muestran a continuación se obtienen con las siguientes propiedades, material y condiciones de contorno:

Fluido en la corriente libre = gas ideal

Viscosidad = 1.789e-05 kg/ms

Conductividad térmica = 0.0242 W/mK

Calor específico = 1000.43 J/kgK

Peso molecular = 28.966 kg/kmol

Número de Mach = 0.025

Presión en el campo lejano = 40000 Pa

Temperatura en el campo lejano = 250 K

Rugosidad de la pared = 0 m

Densidad de la malla = fina

Número de Reynolds = 1e05

La Figura 5.5 representa la gráfica de coeficiente de presión a lo largo de la superficie de sustentación con ángulo de ataque de 0°.

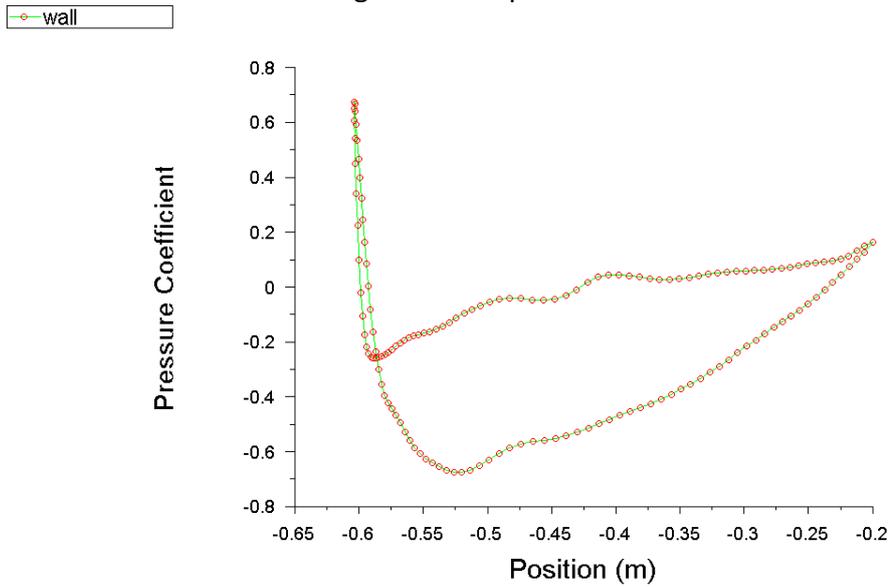


Figura 5.5. Gráfico de Coeficiente de presión a lo largo de la superficie de sustentación

La Figura 5.6 muestra el contorno de presión para la superficie de sustentación con ángulo de ataque de 0°.

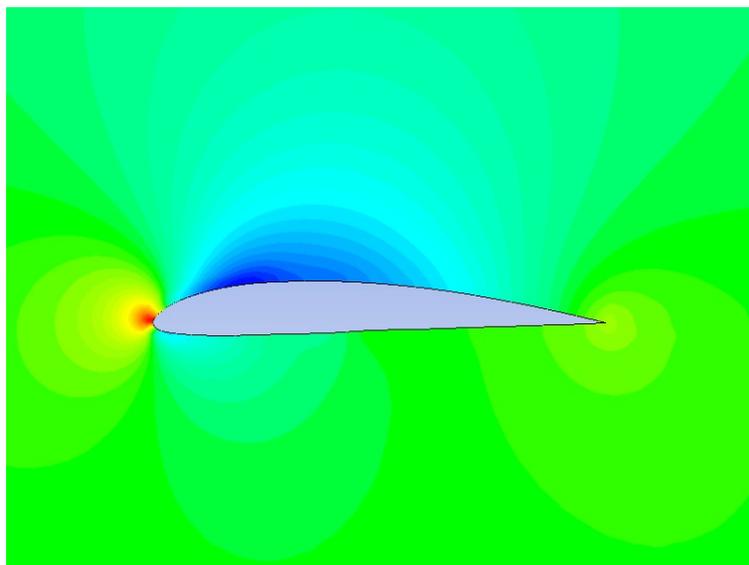


Figura 5.6. Contornos de presión estática para el caso base

Las fuerzas de sustentación y de resistencia sobre la superficie de sustentación dependen en gran medida del ángulo de ataque. Por lo tanto es muy importante conocer las características de sustentación del perfil aerodinámico con el fin de predecir el ángulo de ataque en el que se produce la máxima sustentación.

La Figura 5.7 se obtiene registrando el coeficiente de sustentación para diferentes ángulos de ataque, y utilizando para hacer la gráfica cualquier hoja de cálculo (por ejemplo Excel).

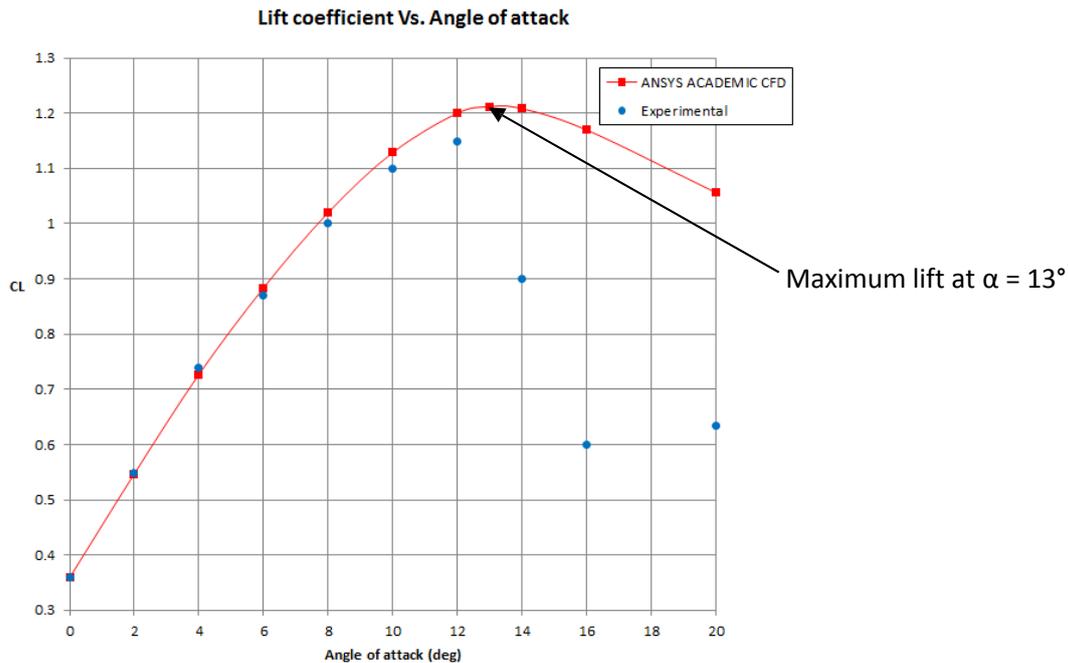


Figura 5.7. Variación del coeficiente de sustentación versus el ángulo de ataque, $Re = 1.0e+5$

La característica de sustentación de la superficie aerodinámica se compara con los datos experimentales proporcionados por la Universidad de Iowa. Se observa que el coeficiente de sustentación varía linealmente con el ángulo de ataque y alcanza el valor máximo para un ángulo de ataque de aproximadamente 13° . Después de alcanzar el valor máximo, el coeficiente de sustentación disminuye con incrementos adicionales en el ángulo de ataque porque el flujo se separa de la superficie superior del perfil alar y se forma una región de estela. La separación del flujo no es deseable, ya que genera gradiente de presión adverso y aumenta el arrastre por presión.

La gráfica de coeficiente de presión sobre la superficie para un ángulo de ataque de 13° , con el que se genera la máxima sustentación se muestra a continuación.

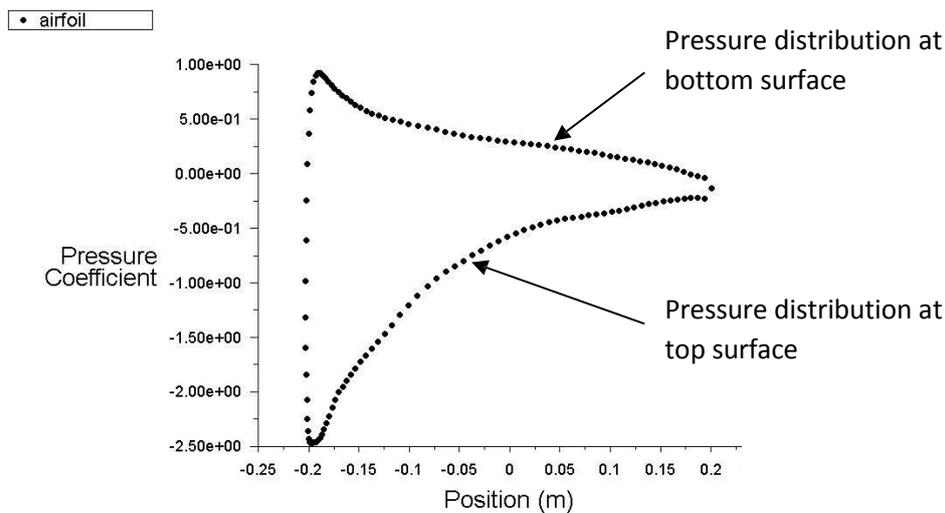


Figura 5.8. Variación del coeficiente de presión sobre la superficie del perfil para $\alpha=13^\circ$

En el punto de estancamiento la velocidad del fluido es cero. A partir de la ecuación de Bernoulli, se espera alta presión en la región de baja velocidad y viceversa, lo que se puede observar en los contornos de presión y velocidad que se muestran en la Figura 5.9.

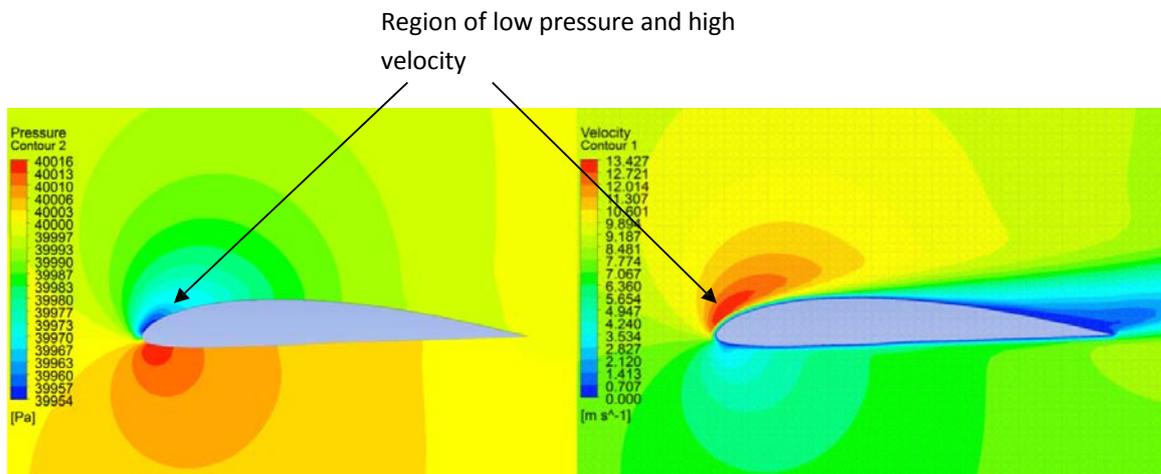


Figura 5.9. Contornos de presión (izquierda) y velocidad (derecha) para $\alpha=13^\circ$

La región donde la presión aumenta desde su valor mínimo al valor de la presión en el borde de salida se llama región de recuperación de presión. Tanto en el contorno de presión como en la figura de la variación del coeficiente de presión sobre la superficie del perfil aerodinámico se observa que la presión en la superficie superior del perfil tiene una disminución inicialmente cerca de la nariz y se recupera de nuevo al final. La presión media de la superficie inferior del perfil aerodinámico es mayor que la de la superficie superior lo que causa la sustentación (en este caso ascenso).

Verificación de resultados

Este ejercicio le permite calcular el coeficiente de sustentación en varios ángulos de ataque. Comparando el coeficiente de sustentación con el ángulo de

ataque. Comparando el coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque se obtiene que el ángulo de ataque para máxima sustentación (stalling angle) es de unos 13 grados para un número de Reynolds de $1.0E + 5$. Estos resultados se obtuvieron para un número de Mach de aproximadamente 0,025 usando la opción de malla fina. Para este mismo número de Reynolds, el ángulo de caída para este perfil aerodinámico según lo informado experimentalmente es de aproximadamente 12 grados [2].

Nota importante: Para ángulos de ataque mayores que 0° es necesario tener en consideración que en esta simulación se está modificando la dirección de la velocidad (no la orientación del perfil) y que la fuerza de arrastre se produce en la dirección de la velocidad y la de sustentación perpendicular a esta. Los coeficientes de arrastre (**Drag coefficient**) y de sustentación (**Lift**) que reporta el programa están determinados en la dirección x y en la dirección y , respectivamente. Para poder determinar los coeficientes de arrastre y sustentación correctos se deben utilizar las siguientes ecuaciones,

$$C_{D\theta} = \frac{C_{Dx} + C_{Ly} / \cos \theta}{\cos \theta + \tan \theta} \quad (5.2)$$

$$C_{L\theta} = \frac{C_{Ly} - C_{D\theta} \sin \theta}{\cos \theta} \quad (5.3)$$

Donde C_{Dx} y C_{Ly} son los coeficientes que reporta el programa y θ el ángulo de ataque.

Estas ecuaciones salen al simultanear las ecuaciones de balance de fuerzas en las direcciones x e y .

$$C_{D\theta} \cos \theta - C_{L\theta} \sin \theta = C_{Dx} \quad (5.4)$$

$$C_{D\theta} \sin \theta + C_{L\theta} \cos \theta = C_{Dy} \quad (5.5)$$

6. Realización de experimentos y simulaciones

En esta práctica se evaluarán experimentalmente los coeficientes de arrastre y sustentación para dos perfiles aerodinámicos variando el ángulo de ataque. También se evaluará el coeficiente de arrastre para varios objetos y dos modelos de automóviles a diferentes números de Reynolds. Después se utilizará el programa "ANSYS Fluent" para comprobar la influencia del ángulo de ataque en los coeficientes de arrastre y sustentación del perfil aerodinámico ClarkY.

6.1 Planteamiento de casos

A continuación se explican las diferentes tareas que se deben cumplimentar en esta práctica de laboratorio. Recuerde que para determinar la incertidumbre de una medición debe conocer la sensibilidad de la escala del instrumento (menor división de la escala), así que apunte estos valores para los micromanómetros y dinamómetros utilizados.

Caso 1

Un grupo de aeromodelismo desea determinar la relación entre las características del ala y las condiciones de vuelo. Disponen de un túnel de viento para evaluar un modelo de ala con un factor de escala 2 con respecto al prototipo. Mida las fuerzas de arrastre y sustentación en los dos perfiles aerodinámicos disponibles (modelos de ala) para diferentes ángulos de ataque (desde 0° hasta 14° , incrementando de 2 en 2°). Determine los grupos adimensionales relevantes en este estudio de fuerzas de arrastre y sustentación. Calcule los coeficientes de arrastre y sustentación, teniendo en consideración que cuando el túnel se opera a máxima potencia, la velocidad del flujo antes del perfil es 5.7 m/s. Calcule, para ambos perfiles, las fuerzas de arrastre y sustentación en el prototipo. Indique para qué valor de velocidad en el prototipo son válidas estas fuerzas. Tenga en consideración que a partir de $Re = 10^3$ los coeficientes de arrastre y sustentación casi no dependen del número de Reynolds, por lo que, los coeficientes obtenidos en el modelo se pueden emplear para velocidades mayores en el prototipo. Para una velocidad de despegue y de vuelo del prototipo de 30 m/s, diga con qué ángulo de ataque se debe despegar y cuál es el peso máximo del aeromodelo. ¿Cuál debería ser el ángulo de ataque durante el vuelo? Razone su respuesta. Con los valores obtenidos en los experimentos dibuje las curvas de coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación con respecto al ángulo de ataque y también la curva que relaciona ambos coeficientes (ver Figura 3.3). Por otra parte, utilizando el perfil aerodinámico convenientemente instrumentado, debe medir la presión en el borde de ataque, en diferentes puntos de la cara superior y en un punto de la cara inferior, para la velocidad máxima y un ángulo de ataque ($+20^\circ$). Analice cómo varía la presión a lo largo de ambas caras del perfil y los efectos de esta distribución sobre las fuerzas de arrastre y sustentación. El tiempo disponible para esta tarea es de aproximadamente 40 minutos.

Caso 2

Se dispone de un software para realizar la simulación CFD de un perfil aerodinámico ClarkY. Evalúe los coeficientes de sustentación y arrastre para diferentes ángulos de ataque con las propiedades y condiciones de contorno fijadas en el caso base. Confeccione las curvas que relacionan estos coeficientes con el ángulo de ataque y compare los valores obtenidos con los obtenidos para los dos perfiles evaluados en el túnel de viento (caso 1). Determine el tipo de perfil más adecuado para que el aeromodelo pueda tener un mayor peso. Dispone de ~40 minutos para desarrollar esta tarea.

6.2 Cuestiones

Teniendo en cuenta que las fuerzas de arrastre y sustentación dependen de la densidad, la velocidad, el área, y además del ángulo de ataque, presente la forma en que se obtienen los grupos adimensionales relevantes para la fuerza de arrastre y para la fuerza de sustentación.

Indique con qué ángulo de ataque se debe operar en el despegue y durante el vuelo del aeromodelo, así como el peso máximo que podría tener el prototipo para cada perfil aerodinámico estudiado. Presente las curvas de variación de los

coeficientes de arrastre y sustentación con el ángulo de ataque y diga cómo influyen la forma del perfil aerodinámico y el ángulo de ataque en estos coeficientes.

Presente las curvas de los coeficientes de arrastre y sustentación y del cociente entre ambos con respecto al ángulo de ataque para el perfil aerodinámico estudiado con el programa "ANSYS Academic". Compare esta curva con las obtenidas para los perfiles aerodinámicos evaluados en el túnel de viento. Determine cuál de los tres perfiles permite mover un aeromodelo de mayor peso. Justifique su respuesta.

ANEXO 3: Práctica de laboratorio. Flujo multifásico en un codo de mezcla

Guion de una práctica de laboratorio de la asignatura de Diseño de Instalaciones de Fluidos acerca de un flujo multifásico en un codo de mezcla

1. Objetivos

- Familiarizarse a un nivel intermedio con el uso del programa comercial ANSYS FLUENT para la simulación de flujos multifásicos
- Comprobar la influencia del número de Reynolds en el proceso de unión de dos líquidos inmiscibles.

2. Especificación del problema

Se considera el caso del flujo multifásico en un codo de mezcla, como se ilustra en la Figura 2.1.

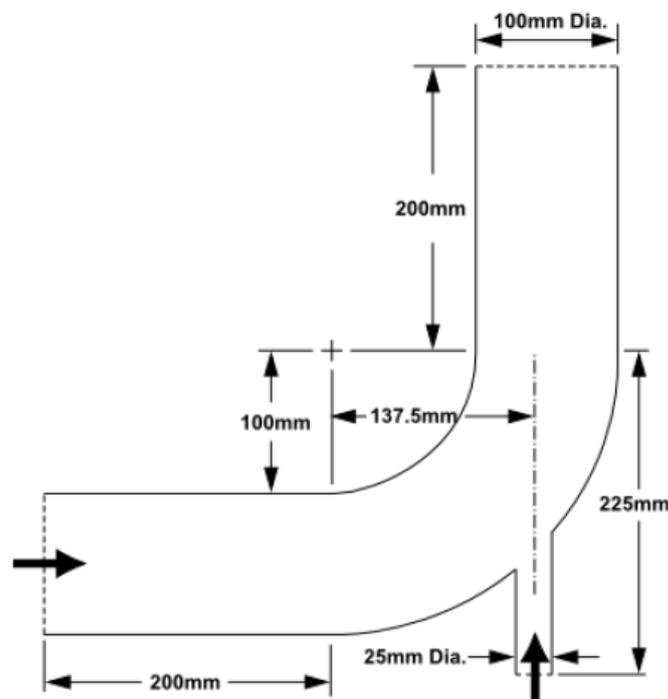


Figura 2.1. Especificación del problema

La geometría está formada por un codo principal, por cuya entrada se introduce agua a una velocidad de 0.4 m/s. Este codo tiene incorporada una pequeña entrada lateral por la que se introduce benceno a 1.1 m/s.

Para realizar esta práctica se trabajará con el software ANSYS ACADEMIC. En el ADD se explica la forma de instalar este programa en los ordenadores personales con Windows 64 bits.

3. CFD con ANSYS FLUENT

3.1 Orientaciones generales para iniciar ANSYS ACADEMIC Workbench

Para iniciar el programa se debe proceder de la siguiente forma:

1. Lanzamiento del espacio de trabajo.
 - a. Haga clic en el menú de inicio
 - b. Ir a Todos los programas > ANSYS 16.2 > Workbench
2. Arrastre el ítem “Fluid Flow (Fluent)” al espacio esquemático del proyecto.

En la Figura 3.1 se muestra el entorno de trabajo de ANSYS ACADEMIC Workbench.

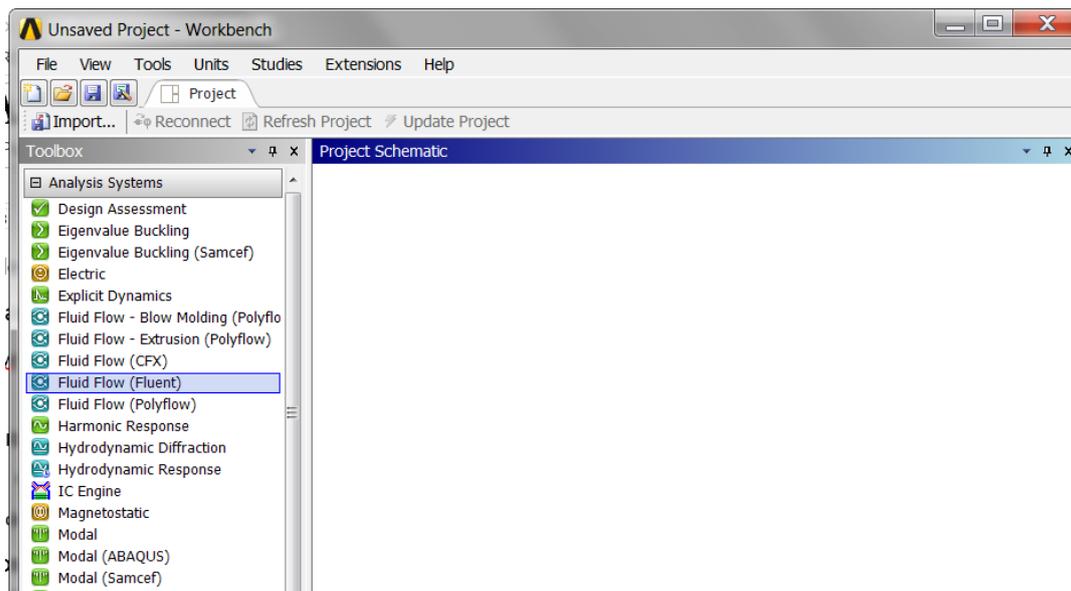


Figura 3.1. Entorno de ANSYS ACADEMIC Workbench

3.2 Creación de la geometría

Una vez arrastrado el ítem Fluid Flow (Fluent) al espacio de trabajo con doble clic en la parte inferior de la nueva ventana puede cambiar el nombre del proyecto.

Con doble clic sobre **Geometry** se abre el Modelador de diseño.

El primer paso al abrir el modelador de diseño consiste en seleccionar el sistema de unidades de longitud deseado. En este ejercicio se deben seleccionar las

unidades en milímetros pinchando **Units** en el menú principal y seleccionando **Millimeter**.

La geometría de este problema consiste en una tubería grande principal y una tubería pequeña lateral. El modelador de diseño de ANSYS está provisto de una serie de geometrías básicas que pueden ser combinadas para crear rápidamente geometrías como la que se pretende estudiar. Para confeccionar la geometría se deben seguir los siguientes pasos:

- Crear la curva de la tubería principal definiendo un segmento de un toroide
- Extruir las caras del segmento del toroide para formar las prolongaciones de la entrada y la salida
- Crear la tubería lateral añadiendo un cilindro básico
- Usar la herramienta de simetría para reducir el modelo a la mitad, de manera que se reduzcan los cálculos computacionales.

Crear la tubería principal

Crema un nuevo toroide para la curva de la tubería seleccionando **Create > Primitives > Torus**

En **Details View** del nuevo torus (**Torus1**) fijar **Base Y Component** en -1. Esto especifica el vector de dirección desde el origen hasta el centro de la sección transversal circular en el inicio del torus. Del mismo modo, especificar el ángulo; el radio de entrada; y el de salida como se muestra a continuación:

| Details View | |
|---------------------------------------------------|--------------|
| [-] Details of Torus1 | |
| Torus | Torus1 |
| Base Plane | XYPlane |
| Operation | Add Material |
| Origin Definition | Coordinates |
| <input type="checkbox"/> FD3, Origin X Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD4, Origin Y Coordinate | 0 mm |
| <input type="checkbox"/> FD5, Origin Z Coordinate | 0 mm |
| Axis Definition | Components |
| <input type="checkbox"/> FD6, Axis X Component | 0 |
| <input type="checkbox"/> FD7, Axis Y Component | 0 |
| <input type="checkbox"/> FD8, Axis Z Component | 1 |
| Base Definition | Components |
| <input type="checkbox"/> FD9, Base X Component | 0 |
| <input type="checkbox"/> FD10, Base Y Component | -1 |
| <input type="checkbox"/> FD11, Base Z Component | 0 |
| <input type="checkbox"/> FD12, Angle (>0) | 90 ° |
| <input type="checkbox"/> FD13, Inner Radius (>0) | 100 mm |
| <input type="checkbox"/> FD14, Outer Radius (>0) | 200 mm |
| As Thin/Surface? | No |

Figura 3.2. Datos correspondientes a torus1

Tras introducir estos datos se pincha en **Generate** situado en la barra de herramientas del modelador de diseño .

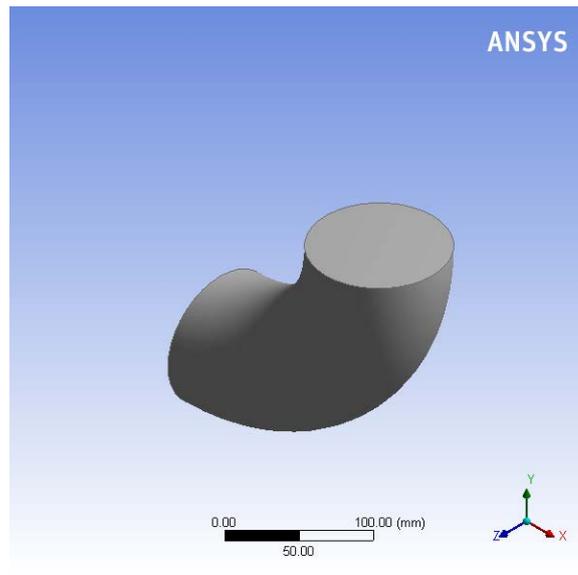


Figura 3.3. Forma del torus

Para alargar las entradas y salidas es necesario que el filtro de selección este fijado en **Faces**. Se selecciona la cara superior del codo (en la dirección positiva de Y) y se pincha en el botón Extrude. En **Details View** de la nueva extrusión (**Extrude1**) seleccione **Apply** a la derecha de **Geometry**. Esto acepta la cara seleccionada como geometría base de la extrusión. A la derecha de **Direction Vector** se pincha sobre **None (Normal)**. Con el filtro de selección **Faces** todavía activado se selecciona la misma cara en el codo para especificar que la extrusión será normal a la cara y se pincha en **Apply**.

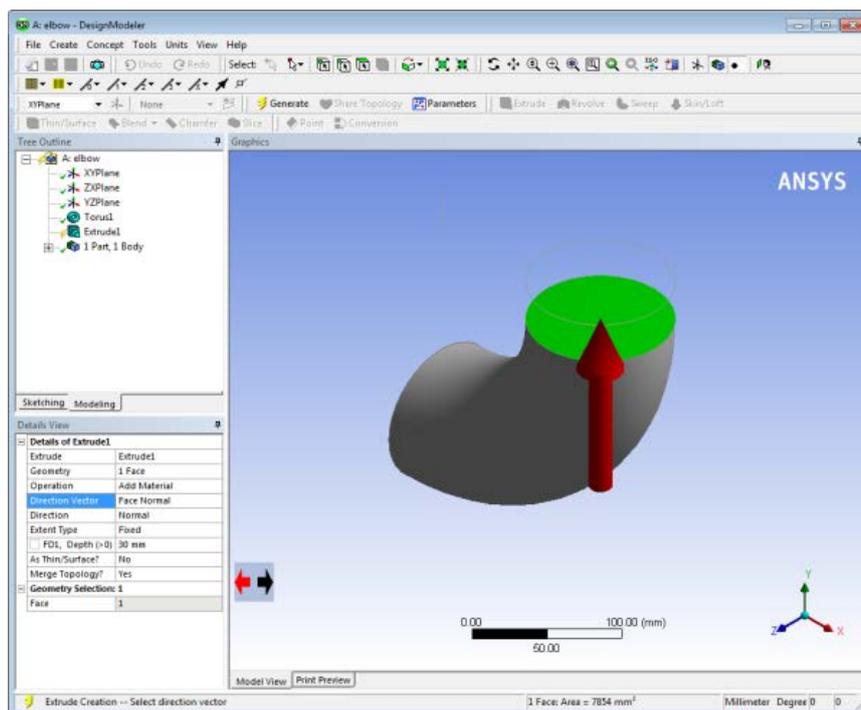


Figura 3.4. Dirección de extrusión.

Se introduce 200 en **FD1, Depth (>0)** y se pincha en **Generate**.

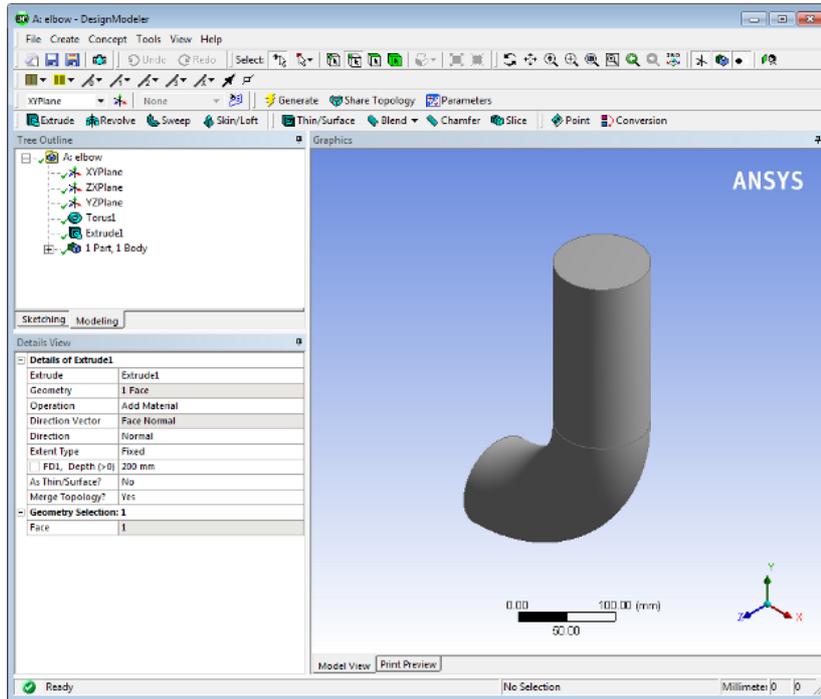


Figura 3.5. Torus con salida extruida.

Del mismo modo se crea una extrusión de la otra cara del segmento torus para crear 200 mm de extensión en la entrada. Para mayor comodidad es recomendable rotar la figura manteniendo presionado el botón central del ratón y facilitar así la visibilidad de la sección.

Tras introducir los parámetros de la extrusión y seleccionando nuevamente **Generate**, se obtiene la geometría de la Figura 3.6

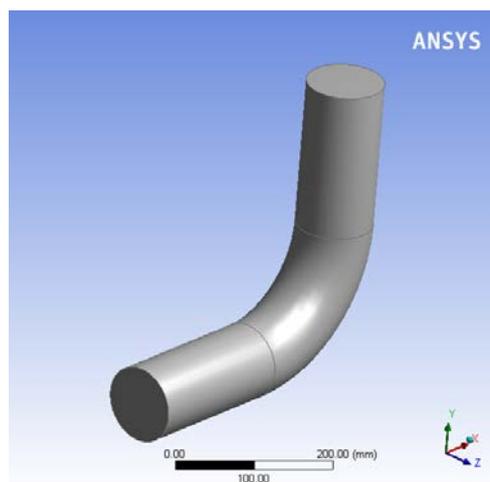


Figura 3.6. Geometría del codo principal.

Crear la tubería lateral

Seleccionar del menú principal **Create > Primitives > Cylinder**.

En **Details View**, se fijan los siguientes parámetros para el cilindro y se pincha en **Generate**:

| Tab | Setting | Value |
|----------------------|--------------------------|---------|
| Details of Cylinder1 | BasePlane | XYPlane |
| | FD3, Origin X Coordinate | 137.5 |
| | FD4, Origin Y Coordinate | -225 |
| | FD5, Origin Z Coordinate | 0 |
| | FD6, Axis X Component | 0 |
| | FD7, Axis Y Component | 125 |
| | FD8, Axis Z Component | 0 |
| | FD10, Radius (>0) | 12.5 |

Figura 3.7. Datos del cilindro de la entrada lateral

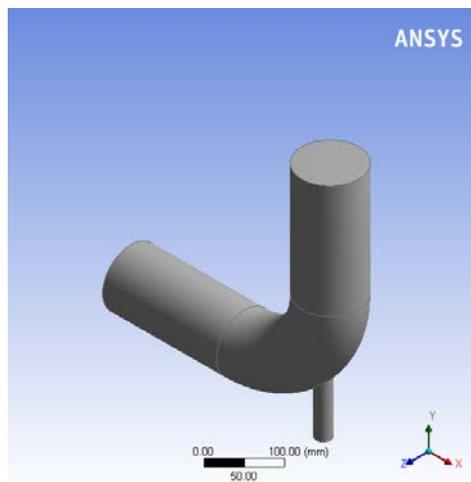


Figura 3.8. Geometría del codo.

Crear el plano de simetría

Se selecciona del menú principal **Tools > Symmetry**. Entonces, haga clic en **XYPlane** en **Tree Outline** y pinche **Apply** en **Symmetry Plane 1** en **Details View**. Seleccione **Generate** nuevamente.

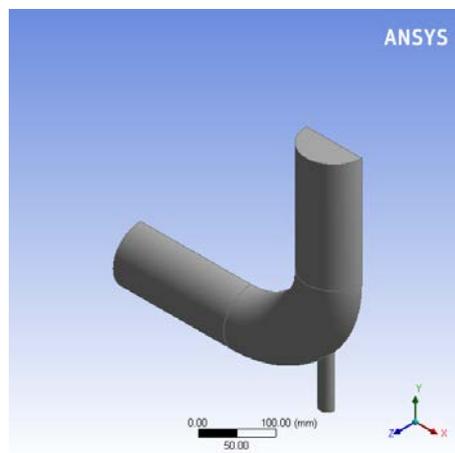


Figura 3.9. Mitad simétrica del codo.

Cambiar el tipo a “Fluido”

En **Tree Outline** debe expandir **1 Parts, 1 Body**. Seleccione **Solid**, en **Details View** del cuerpo, cambie el nombre **Body** de **Solid** a **Fluid** y cambie el tipo “**Fluid/Solid**” a **Fluid** y haga clic en **Generate**.

| Details View | |
|------------------------|-----------------------------|
| Details of Body | |
| Body | Fluid |
| Volume | 2.5159e+006 mm ³ |
| Surface Area | 1.7636e+005 mm ² |
| Faces | 8 |
| Edges | 18 |
| Vertices | 12 |
| Fluid/Solid | Fluid |
| Shared Topology Method | Automatic |
| Geometry Type | DesignModeler |

Figura 3.10. Cambio de tipo a fluido

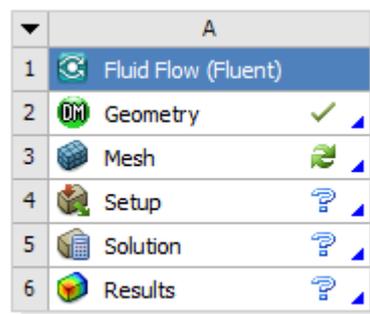
Cerrar el Modelador de Diseño y guardar proyecto.

Para guardar el proyecto, primero debe cerrar el modelador de diseño y en la ventana del Workbench en **File > Save as**. Si pincha en **View > File** puede ver los archivos que se han generado y su ubicación.

3.3 Mallado de la geometría

Abrir el programa de mallado

En esta sección la geometría se malla con un total de 118557 elementos. El primer paso es abrir el programa de mallado de ANSYS. En el espacio de trabajo se hace doble clic en la celda **Mesh**.



elbow

Figura 3.11. Ventana para seleccionar el programa de mallado

Esto abre el programa de mallado de ANSYS con la geometría del codo ya cargada.

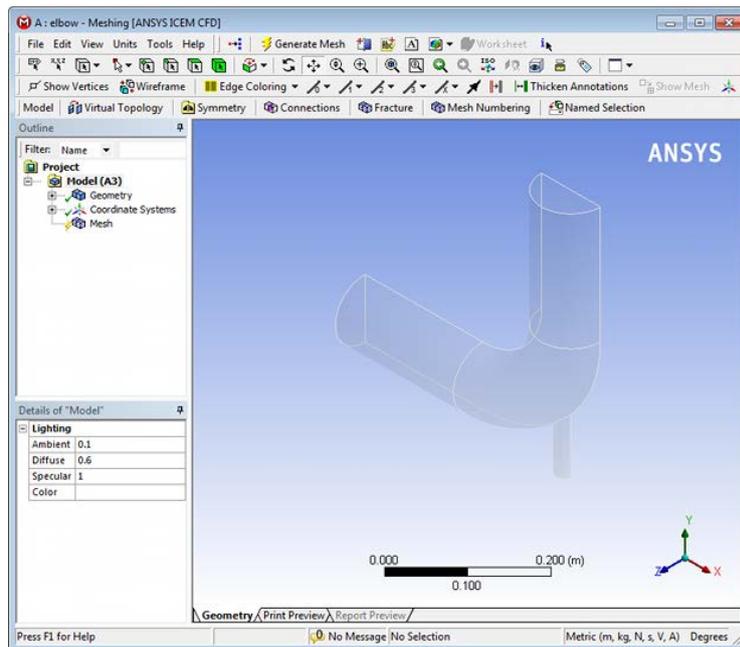


Figura 3.12. Interfaz del programa de mallado.

Crear nombres

En esta sección se nombran las diversas partes de la geometría.

En primer lugar se debe crear el nombre para la entrada grande que se denomina "velocity-inlet-large". Para realizar la selección, primero elija el filtro de selección **Faces**, y luego seleccione la cara de la entrada principal de la tubería (la cara seleccionada debe ponerse de color verde). Luego haga clic derecho y seleccione **Create Named Selection**. En la nueva ventana que aparece, escriba velocity-inlet-large y seleccione **OK** para confirmar.

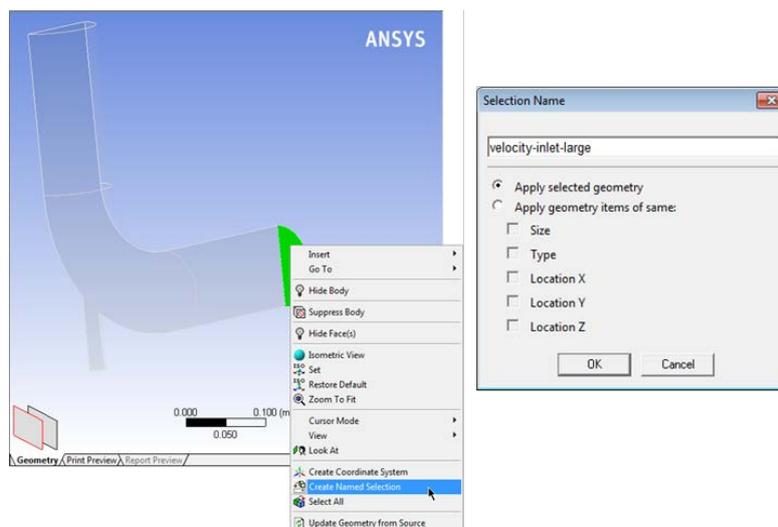


Figura 3.13. Creación del nombre velocity-inlet-large en la entrada principal.

A continuación, de igual forma se crea el nombre para la entrada pequeña lateral “velocity-inlet-small”, la salida de la tubería principal “pressure-outlet” y el plano de simetría “symmetry”.

Por último, se crea el nombre del cuerpo del fluido. Para ello cambie el filtro de selección a **Body**  y seleccione el codo, haga clic derecho y seleccione **Create Named Selection**. En la nueva ventana que aparece, escriba “Fluid” y seleccione **OK** para confirmar.

Pasos para generar el mallado

En la ventana **Outline**, seleccionar **Mesh** debajo de **Project/Model** para visualizar la ventana **Details of “Mesh”**

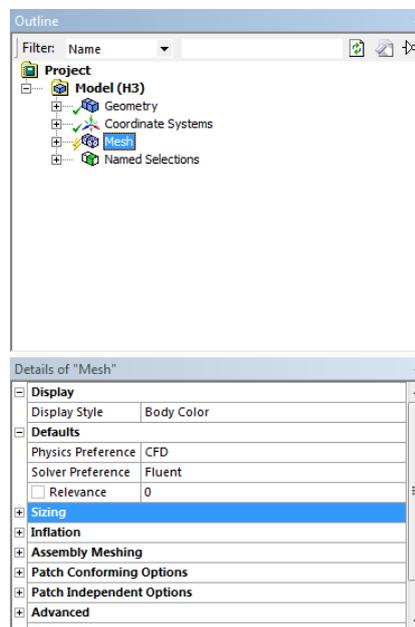


Figura 3.14. Mallado básico

Expandir la pestaña **Sizing** haciendo clic en el signo “+” para mostrar parámetros adicionales.

Cambie **Relevance Center** a **Fine** clicando sobre el valor por defecto, **Coarse** y seleccionando **Fine** en la lista desplegable. También cambie **Smoothing** a **High**.

Añada un control del tamaño del mallado. Con **Mesh** aun seleccionado, pinche la figura del codo en el gráfico para seleccionarlo. Clicando el botón derecho seleccionar **Insert**→**Sizing**.

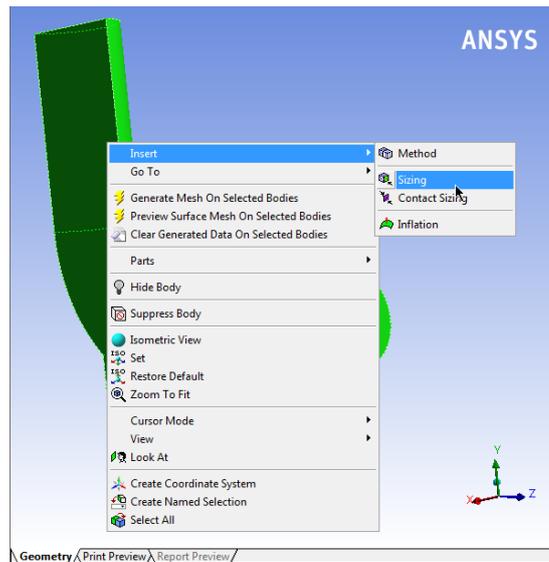


Figura 3.15. Creación de un control del mallado.

Una nueva entrada **Body Sizing**, aparecerá debajo de **Mesh**. Seleccione la nueva entrada e introduzca $6e-3$ en **Element Size**.

Pinche de nuevo sobre **Mesh** y expanda la pestaña **Inflation** en **Details of "Mesh"**. Cambie **Use Automatic Inflation** a **Program Controlled**.

Haga clic con el botón derecho sobre **Mesh** y seleccione **Update**.

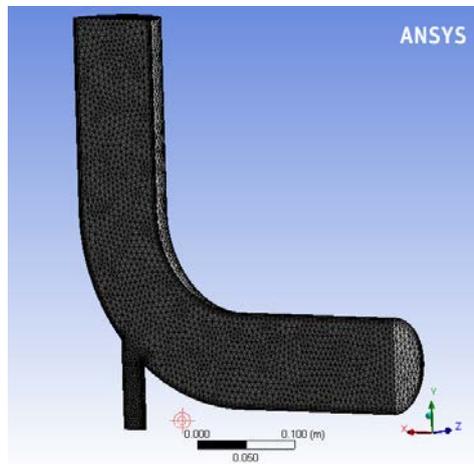


Figura 3.16. Mallado del codo.

Verificar la malla

Haga clic en **Mesh > Expand Statistics**. Debe tener 35024 **Nodes** y 118557 **Elements**.

Cierre el programa de mallado de ANSYS ACADEMIC.

3.4 Configuración física

Para obtener la marca de verificación al lado de malla, haga clic derecho sobre **Mesh** y seleccione **Update**.

Iniciar Fluent

Con doble clic sobre **Fluent** se inicia el programa de simulación.

Cuando el **FLUENT Launcher** aparece debe cambiar en las opciones a **Double Precision**, a continuación, haga clic en **OK**. En el solucionador de doble precisión, cada número en punto flotante se representa usando 64 bits en contraste con el solucionador de precisión simple que utiliza 32 bits. Los bits adicionales aumentan no sólo la precisión, sino también la gama de magnitudes que se puede representar. La desventaja de usar doble precisión es que requiere más memoria.

Aquí es donde se especifican las ecuaciones que gobiernan y las condiciones de contorno para el problema. En el lado izquierdo de la interfaz de FLUENT, se muestran varios aspectos indicados en el **Problem Setup**. Se trabaja de arriba a abajo en los items del **Problem Setup** para configurar la física del problema. En la parte derecha, está el panel de gráficos (**Graphics**) y, por debajo, el panel de comandos (**Command**).

Definir las características generales del proyecto

La ventana de configuración general debe quedar como se muestra en la Figura 3.17 para esta simulación.

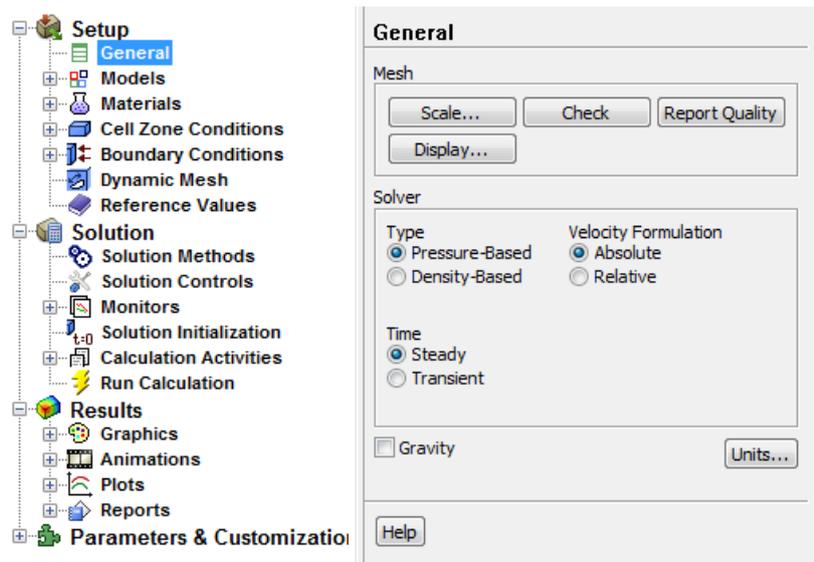


Figura 3.17. Características generales de la simulación

Así que esta simulación será de tipo basada en la presión, con una formulación de velocidad absoluta, estacionaria en el tiempo y sin considerar la gravedad.

El primer paso consiste en cambiar las unidades de longitud puesto que la unidad de longitud por defecto de Fluent es el metro. Para ello en la ventana de

configuración general se pincha sobre **Units** que muestra el cuadro de dialogo **Set Units**.

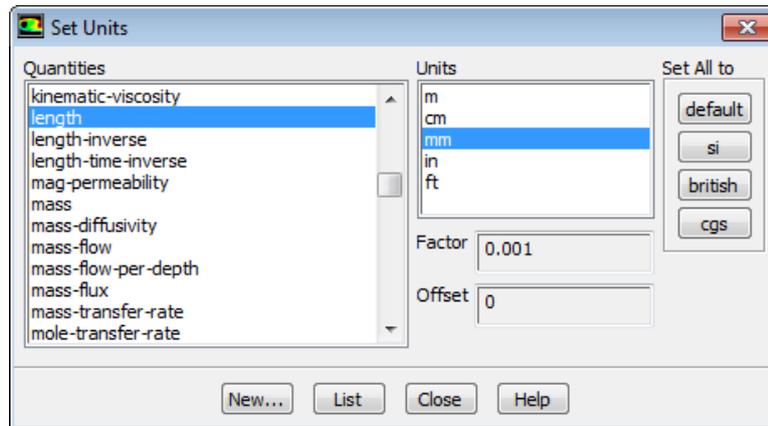


Figura 3.18. Cuadro de dialogo Set Units

Seleccione **length** en la lista **Quantities** y **mm** en la lista de **Units**. Cierre el cuadro de dialogo

Chequear la malla

Haga clic en **Mesh > Info > Size**. Debe tener una salida en el panel de comandos que declare que existen 118557 **cells**.

Haga clic en **Mesh > Check**. No deben aparecer errores en el panel de comandos.

Modelos

Las ecuaciones que se utilizan en esta simulación se muestran en la Figura 3.19.

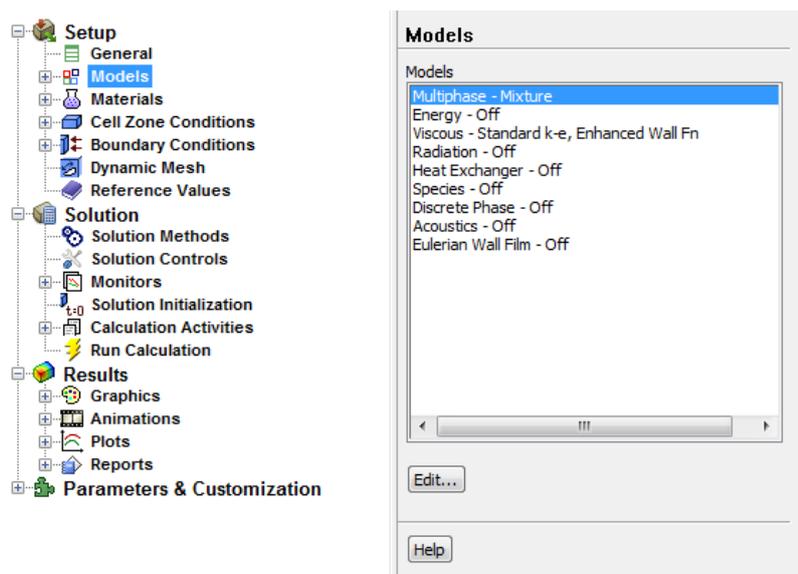


Figura 3.19. Ecuaciones que se utilizan en la simulación

Se activa el modelo multifásico seleccionando en la ventana de configuración de modelos **Multiphase-Off** y se hace clic sobre **Edit** que abre el cuadro de dialogo

Multiphase Model. Seleccione **Mixture** de la lista **Model**, y deje las dos fases eulerianas que aparecen por defecto.

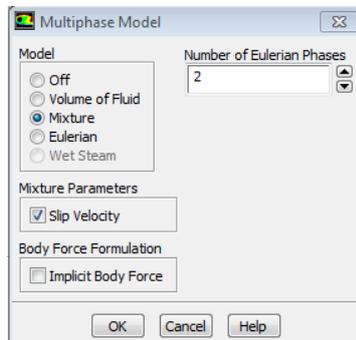


Figura 3.20. Cuadro de dialogo Multiphase Model

Pulse OK para cerrar el cuadro de dialogo.

Se activa el modelo turbulento k-epsilon seleccionando en la ventana de configuración de modelos **Viscous-Laminar** y se hace clic sobre **Edit** que abre el cuadro de dialogo **Viscous Model**. Seleccione **k-epsilon (2 eqn)** en la lista **Model**. Se mantiene **Standard** por defecto en la lista **K-epsilon Model** y se selecciona **Enhanced Wall Treatment** para **Near-Wall Treatment**.

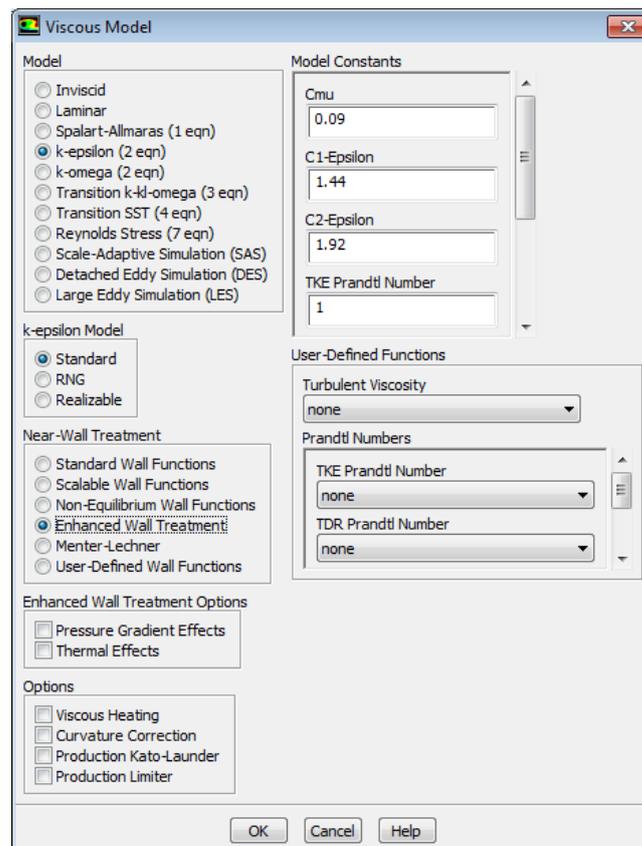


Figura 3.21. Cuadro de dialogo Viscous Model

Pulse OK para cerrar el cuadro de dialogo.

Especificar las propiedades del material

Haga clic en **Setup > Materials > Fluid > Create/Edit**.

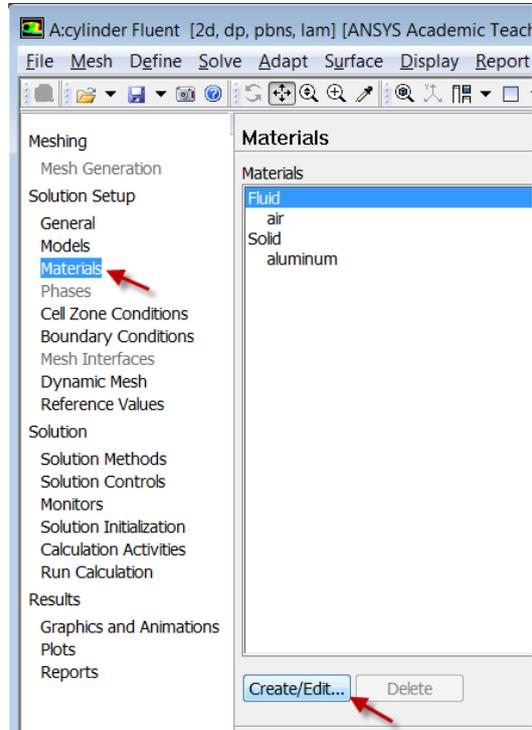


Figura 3.22. Para especificar las propiedades del material (fluido)

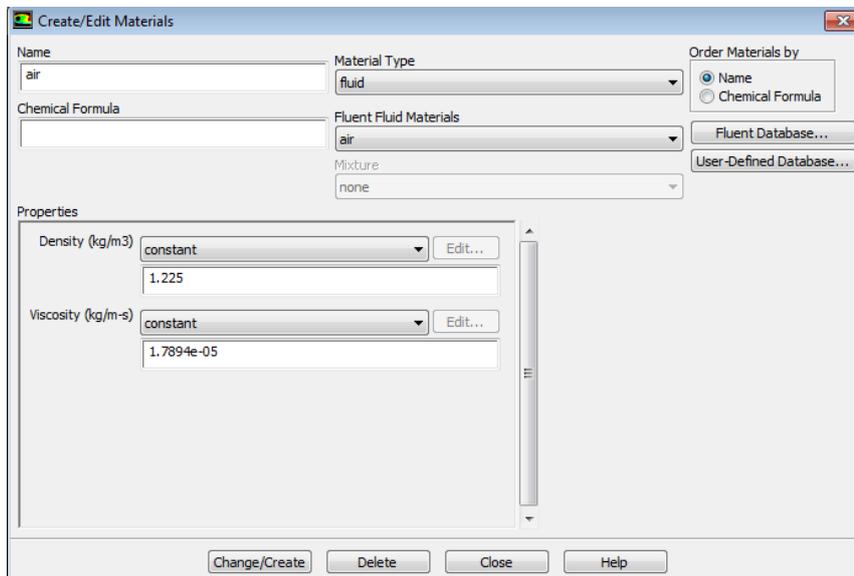


Figura 3.23. Propiedades del aire

Para este ejercicio se va a utilizar agua líquida y benceno de manera que es necesario buscar estos dos fluidos en la base de datos de Fluent.

Seleccione **Fluent Database** para abrir el cuadro de dialogo **Fluent Database Materials** y busque **water-liquid (h2o<l>)**.

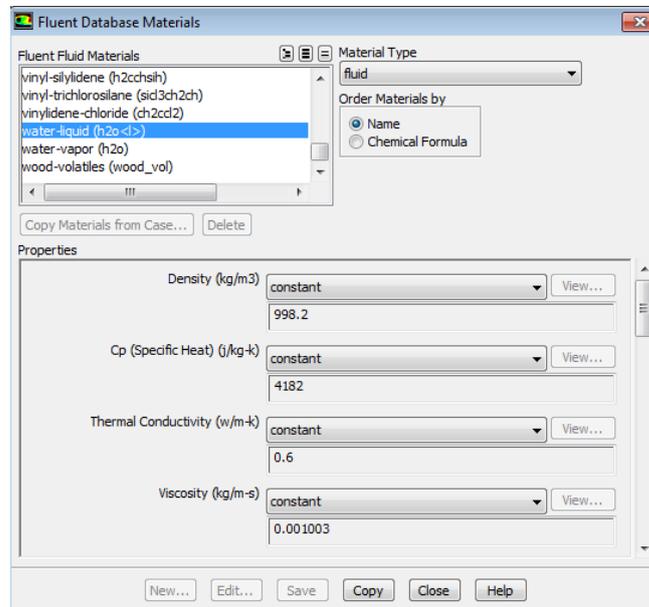


Figura 3.24. Propiedades del agua líquida

Haga clic sobre **Copy** y cierre el cuadro de dialogo pinchando **Close**. Debe repetir el proceso y buscar **benzene-liquid (c6h6<l>)**.

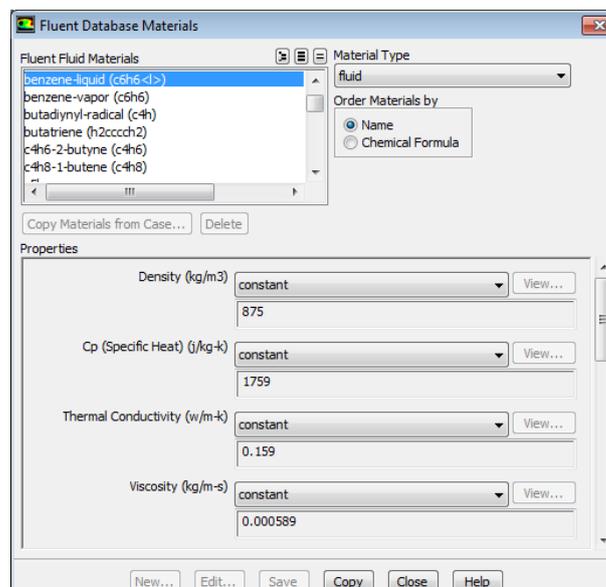


Figura 3.25. Propiedades del benceno

Haga clic en **Change/Create** y a continuación haga clic en **Close**.

Definición de fases

Pinche el menú extensible de la parte superior **Define** → **Phases** para abrir el cuadro de dialogo **Phases**

Tras seleccionar **Phase-1-Primary Phase** haga clic en **Edit** abriendo el cuadro de dialogo **Primary Phase**. Cambie el nombre a “phase-1-water” y seleccione **water-liquid** en **Phase Material**. Cierre el cuadro de dialogo pulsando en **OK**.

Tras seleccionar **Phase-2-Secondary Phase** haga clic en **Edit** abriendo el cuadro de dialogo **Secondary Phase**. Cambie el nombre a “phase-2-benzene” y seleccione **benzene-liquid** en **Phase Material**. Cierre el cuadro de dialogo pulsando en **OK**.

Haga clic en **Close** para cerrar.

Condiciones de contorno

Haga clic en **Setup** > **Boundary Conditions** para abrir la ventana de configuración de las condiciones de contorno.

Seleccione “velocity-inlet-large” de la lista **Zone** y fije como **Phase, phase-1-water**. Seleccione el **Type** a **velocity-inlet**. Clic **Edit....** y seleccione **Velocity Specification Method** a **Components**, fije la **X-Velocity** en 0.4 m/s, y la **Y-Velocity** y **Z-Velocity** en 0 m/s. Clic **Ok** para cerrar.

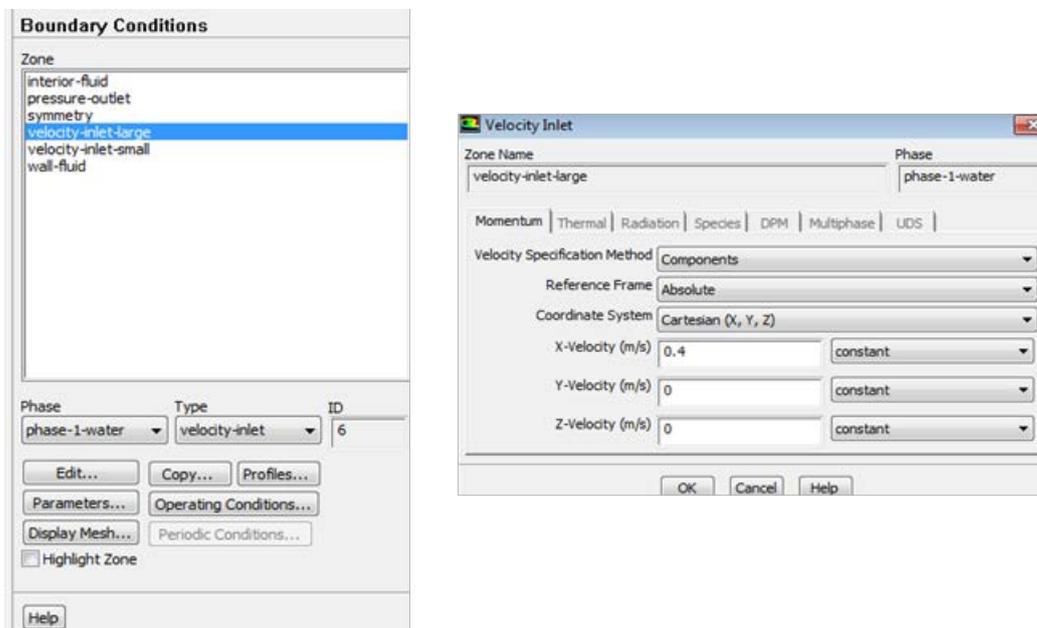


Figura 3.26. Condiciones de contorno de la entrada grande

Seleccione “velocity-inlet-small” de la lista **Zone** y fije como **Phase, phase-2-benzene**. Seleccione el **Type** a **velocity-inlet**. Clic **Edit....** y seleccione **Velocity Specification Method** a **Components**, fije la **Y-Velocity** en 1.1 m/s, y la **X-Velocity** y **Z-**

Velocity en 0 m/s. Seleccione la pestaña **Multiphase** e introduzca 1 en **Volume Fraction**. Clic Ok para cerrar.

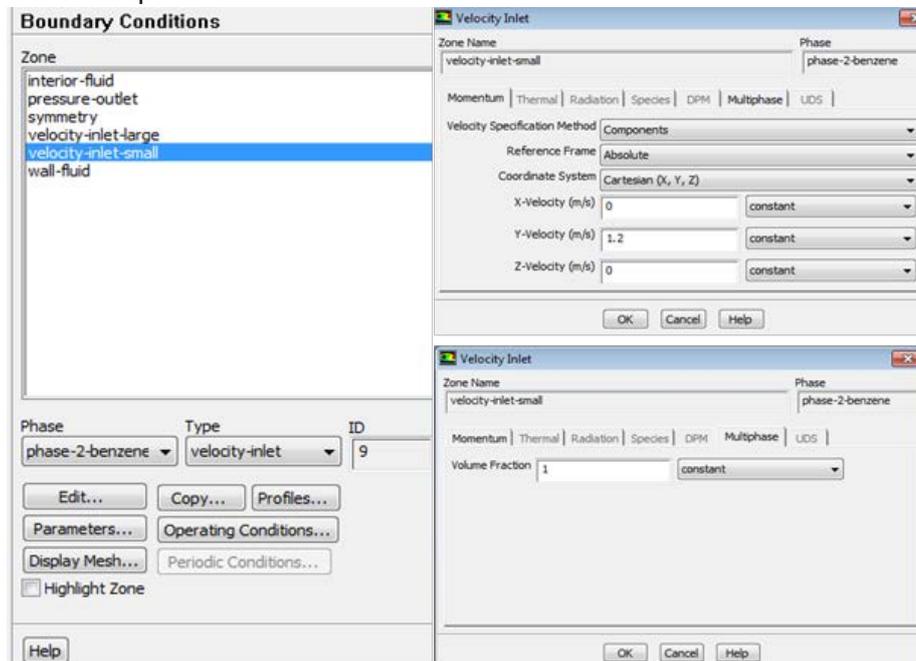


Figura 3.27. Condiciones de contorno de la entrada pequeña

Seleccione “pressure-outlet” de la lista **Zone** y fije como **Phase, mixture**. Seleccione el **Type** a **pressure-outlet**. Mantenga el valor de presión por defecto. Cambie **Specification Method** a **Intensity and Hidraulic Diameter** de la lista desplegable. Mantenga el valor por defecto del 5% en **Turbulent Intensity** e introduzca 100 mm en **Hydraulic Diameter**.

Haga clic en Ok para cerrar.

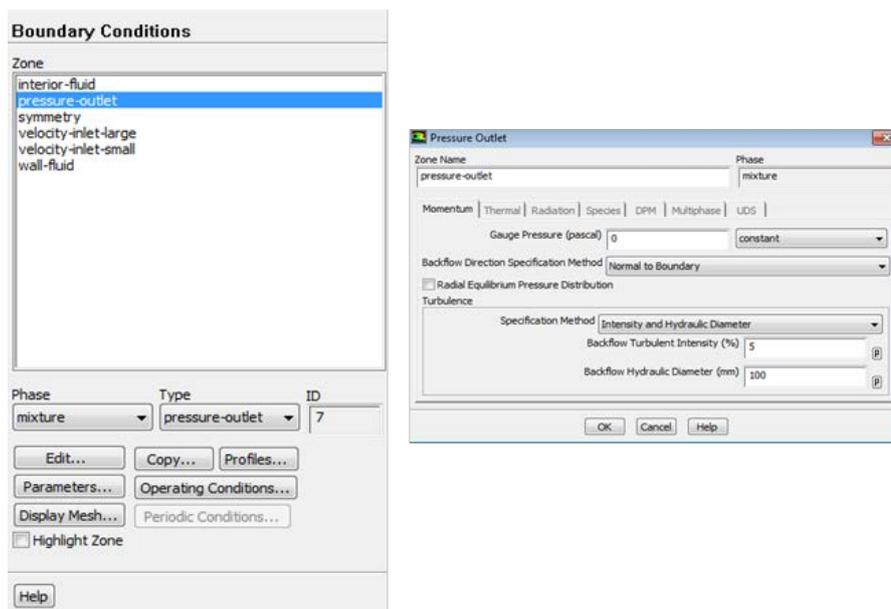


Figura 3.28. Condiciones de contorno de la salida

Guarde el proyecto (**Save Project**).

3.5 Simulación numérica

Los datos para la simulación numérica también se introducen en el programa FLUENT.

Método de solución

Solution > Solution Methods

Mantenga por defecto:

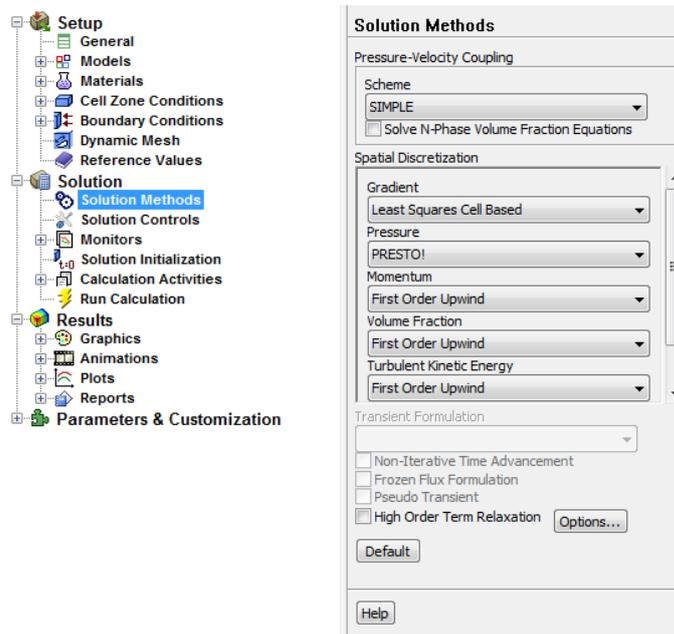


Figura 3.29. Método de solución

Criterios de convergencia

Haga clic en **Solution > Monitors > Residuals > Edit...** y asegúrese de que **Plot** se encuentre activado. Mantenga el **Absolute Criteria** de **Residuals** en 0.001. Clic en **OK** para cerrar el cuadro de diálogo.

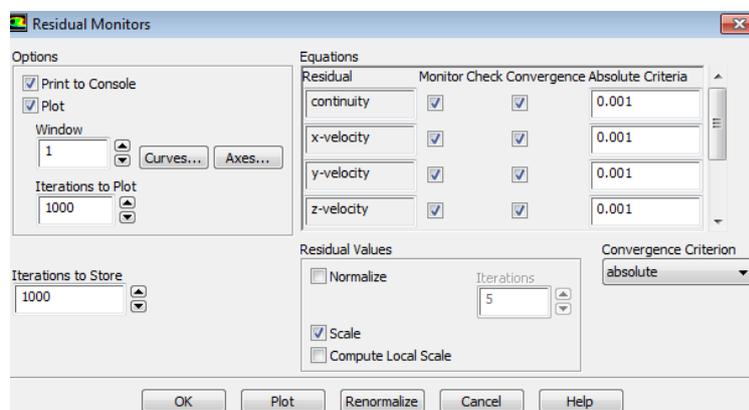


Figura 3.30. Para especificar los límites de convergencia

Inicialización del proyecto

Haga clic en **Solution > Solution Initialization > Hibrid Initialization**. Entonces, haga clic en **Initialize**.

Iterar hasta lograr convergencia

Haga clic en **Solution > Run Calculation**. Introduzca el **Number of Iterations** a 500 y haga clic en **Calculate**.

Guarde el proyecto (**Save Project**).

3.6 Análisis de resultados a través del post-procesador

Los resultados se pueden visualizar con mayor calidad a través del post-procesador, al que se accede haciendo doble clic sobre el ítem **Results** en la ventana Workbench.

Insertar un contorno de velocidad

Haga clic en **Insert > Contour**. Cambiar **Contour 1** a Contour Velocity. Clic **OK**. Seleccione **Domain = fluid**, **Locations = symmetry 1**, **Variable = Velocity**, **Range = Global** y pinche **Apply**. En la Figura 3.31 se muestra el contorno de velocidad para estas condiciones.

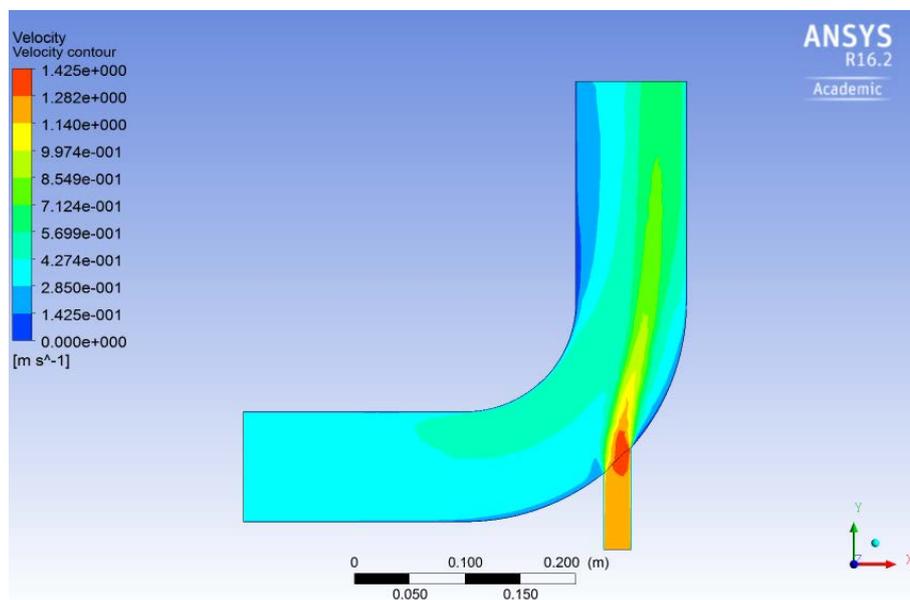


Figura 3.31. Contorno de velocidad

Insertar un contorno de densidad

Haga clic en **Insert > Contour**. Cambiar **Contour 2** a Contour Density. Clic **OK**. Seleccione **Domain = fluid**, **Locations = symmetry 1**, **Variable = Density**, **Range = Global** y pinche **Apply**. En la Figura 3.32 se muestra el contorno de densidad para estas condiciones.

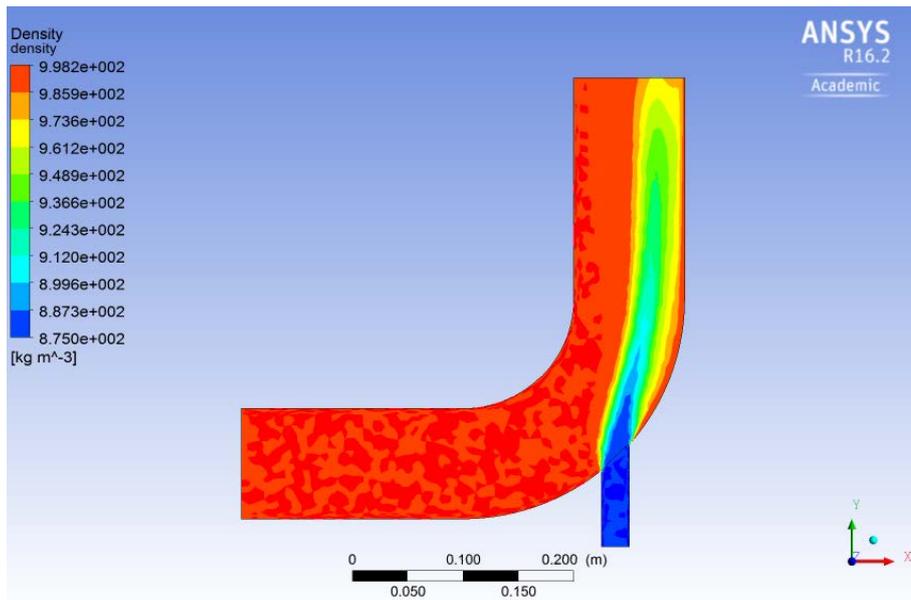


Figura 3.32. Contorno de densidad

Insertar un contorno de presión

Haga clic en **Insert > Contour**. Cambiar **Contour 3** a Contour Pressure. Clic **OK**. Seleccione **Domain = fluid**, **Locations = symmetry 1**, **Variable = Pressure**, **Range = Global** y pinche **Apply**. En la Figura 3.33 se muestra el contorno de presión para estas condiciones.

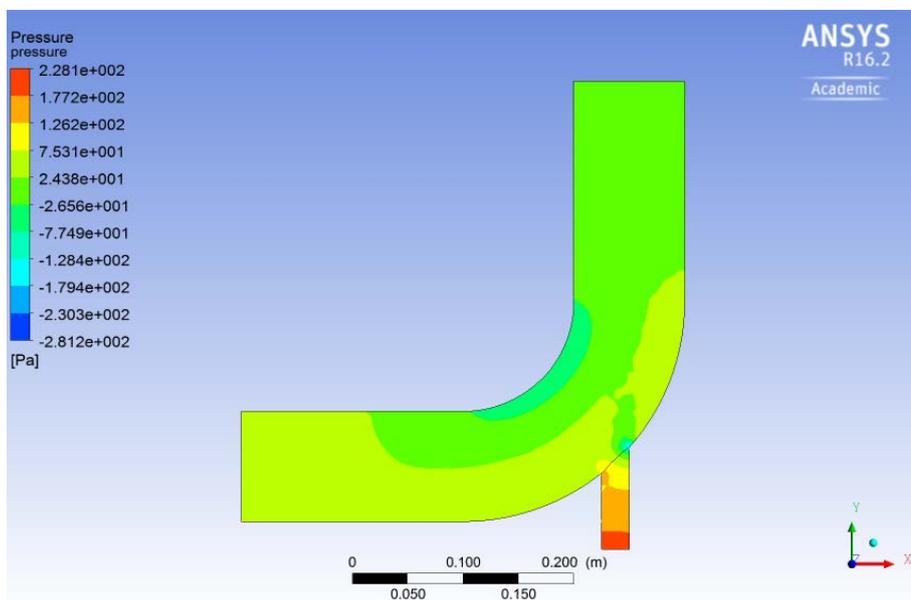


Figura 3.33. Contorno de presión

4. Visualización de ficheros

El usuario puede acceder al proyecto guardado y a todos los archivos relevantes en el directorio de trabajo que se ha especificado al guardar el proyecto.

Suponga que el usuario ha guardado el proyecto bajo el nombre `Mixing_Elbow` en el directorio de trabajo "E:\Tutoriales". Este directorio se estableció al inicio cuando se realizó la acción **File > Save as** y se seleccionó la carpeta "E:\Tutoriales".

Por otra parte, los datos que se leen y escriben por FLUENT mientras se ejecutan las diferentes partes del proyecto en Workbench se guardan en tres archivos.

Los ficheros son los siguientes:

- 1) WorkBench (.wbpj) Project file: 

Este archivo es utilizado por el programa para abrir el proyecto en el entorno del Workbench y siempre está acoplado con una carpeta del mismo nombre donde se ubican todos los ficheros generados.

- 2) Setting (.set) file: 

El archivo de configuración contiene los datos que se utilizan para iniciar la simulación desde el principio. La ubicación del archivo .set es **Working directory > Project Name_files > dp0 > FFF > Fluent**.

- 3) Case (.cas) file: 

El archivo del caso se utiliza para representar la geometría, malla y condiciones de contorno. El solucionador utiliza este archivo para cargar la geometría mallada. La ubicación del archivo .cas es **Working directory > Project Name_files > dp0 > FFF > Fluent**.

- 4) Data (.dat) file: 

El archivo de datos contiene los datos de la solución asociados con la celda de soluciones que resulta de ejecutar el programa. ANSYS ACADEMIC Workbench utiliza este archivo para reiniciar la simulación a partir de los datos existentes. La ubicación del archivo .dat es **Working directory > Project Name_files > dp0 > FFF > Fluent**.

Si desea generar un fichero para utilizarlo posteriormente en otro ordenador debe utilizar la opción de guardado comprimido. En **Workbench > File > Archive** seleccionar la dirección y guardar un fichero .wbpz.

5. Planteamiento de casos

El estudiante debe analizar el proceso de unión de los dos líquidos inmiscibles para diferentes números de Reynolds de ambos fluidos. Se deben analizar varios casos modificando las velocidades de entrada de ambos fluidos, logrando disponer de al menos dos números de Reynolds para cada fluido, es decir, cuatro casos.

Analice con mucha atención la ubicación de los fluidos en la zona bifásica y valore el comportamiento del flujo.