

**Ejemplo de uso de software CFD**  
(Flujo laminar estacionario desarrollado en una tubería de sección redonda)

### **Introducción a ANSYS Fluent**

ANSYS es el líder global en simulaciones computacionales con aplicaciones ingenieriles. Tiene un amplio portafolio de software de simulación, con lo cual tiene amplias aplicaciones científica e industriales. Cuenta con programas computacionales para resolver una amplia gama de problemas y apoyar en el diseño, optimización, control y análisis de una gran variedad de procesos.

#### **¿Qué es ANSYS Fluent?**

ANSYS Fluent es actualmente el software más poderoso para realizar Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés), ayudando a optimizar de manera rápida y profunda el desempeño de muchos productos. Fluent incluye modelos bien validados y poderosos métodos numéricos con la capacidad de llegar a resultados acertados de manera rápida en una amplia gama de aplicaciones CFD.

#### **¿Qué es la Dinámica de Fluidos Computacional?**

La Dinámica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos. Los ordenadores son utilizados para realizar los millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo y disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas.

La verificación de los datos obtenidos por CFD se realiza mediante modelos físicos o mediciones experimentales, en determinadas ocasiones se puede validar con resultados de modelos matemáticos similares.

El método de solución consiste en discretizar una región del espacio dividiéndola en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad se resuelve una matriz algebraica con una ecuación asociada a cada celda de forma iterativa hasta que el error residual es suficientemente pequeño.

Un software CFD requiere normalmente de realizar tres pasos fundamentales (ver Figura 1):

- Pre-procesamiento: consiste en establecer y discretizar el sistema, además de establecer todas las condiciones necesarias para realizar el cálculo CFD.
- Procesamiento: se establecen las ecuaciones gobernantes (modelos) y se resuelven las mismas.
- Post-Procesamiento: es el análisis de los resultados obtenidos, en este paso se realizan decisiones de la simulación, es decir, se evalúa si son correctos los resultados o si se debe repetir algún paso del proceso.

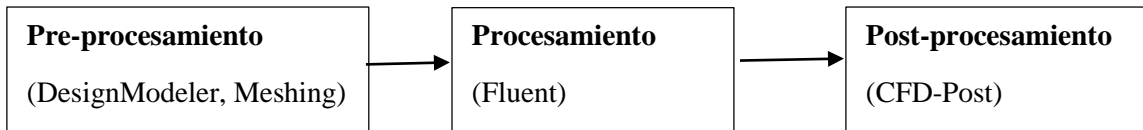


Figura 1.- Secuencia de trabajo para un modelo CFD en ANSYS Fluent.

### **Estructura básica del reporte a realizar:**

Cuando se desarrolla un modelo matemático asistido con software CFD se debe seguir una estructura para reportar el mismo, la cual asegura que el modelo estará perfectamente definido y que será entendido por el lector del reporte, la mayoría de las ocasiones incluye los siguientes puntos:

- Introducción
- Objetivos e hipótesis
- Planteamiento del problema
- Planteamiento del modelo matemático
  - Suposiciones
  - Ecuaciones gobernantes
  - Condiciones de frontera
  - Condiciones iniciales
  - Materiales (propiedades)
- Metodología de solución
  - Resolución matemática del sistema de ecuaciones (si es posible)
  - Software CFD
    - Pre-procesamiento
    - Procesamiento
    - Post-procesamiento
- Resultados
- Análisis de resultados
- Conclusiones
- Referencias

## Ejemplo: Flujo laminar en una tubería de sección redonda.

### ➤ Planteamiento del problema

Considérese un tubo infinitamente largo, de sección redonda constante de radio  $R$ . Dentro del mismo corre un fluido incompresible y newtoniano de manera constante. El fluido corre lentamente a una velocidad constante  $\bar{v}$ , obteniéndose un flujo laminar ( $N_{Re} \leq 2100$ ). Aunque no es necesario, conviene establecer un diámetro (30mm) y un flujo  $Q$  (1.5lpm). El fluido se mueve debido a una diferencia de presión constante a lo largo del mismo (dirección axial). Obtenga el patrón de flujo cuando este se encuentra completamente desarrollado, es decir, no se consideran los efectos de la entrada ni de la salida. Tal como se observa en los siguientes esquemas (ver Figuras 2 y 3):

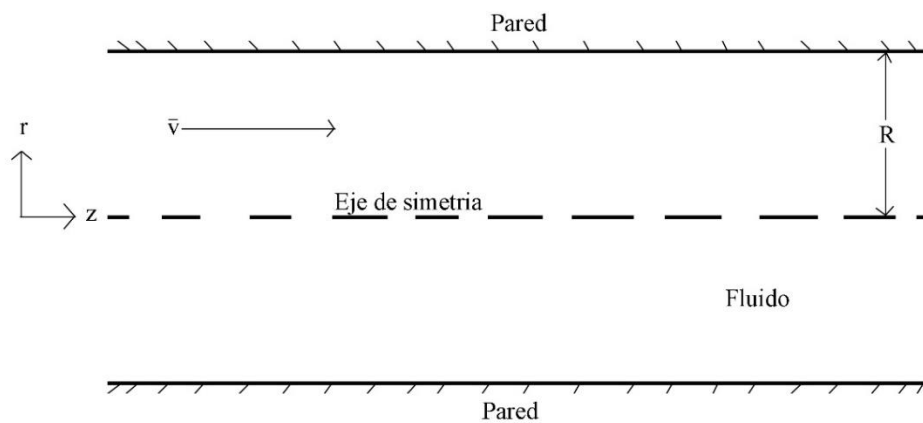


Figura 2.- Esquema del flujo laminar en una tubería de sección redonda (corte axial).

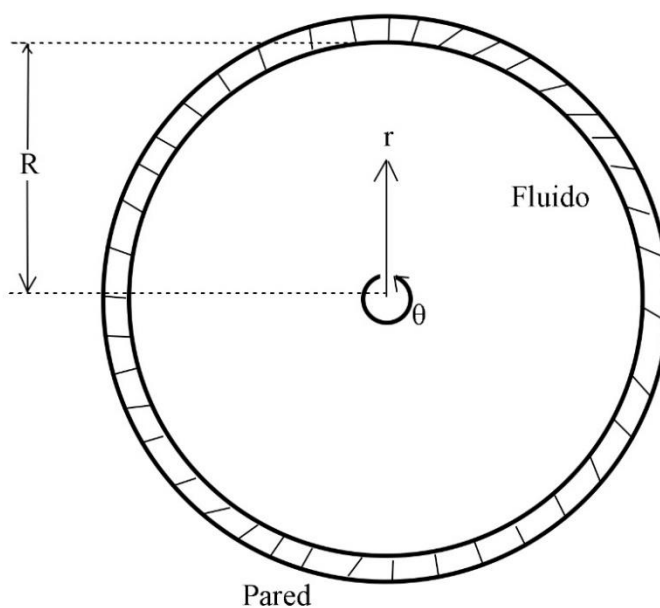


Figura 3.- Esquema del flujo laminar en una tubería (corte transversal).

➤ **Planteamiento del modelo matemático**

• **Suposiciones**

- ❖ Coordenadas cilíndricas
- ❖ Flujo en 1D (z)
- ❖ Estado estacionario
- ❖ Fluido incompresible ( $\rho = \text{constante}$ )
- ❖ Fluido newtoniano ( $\mu = \text{constante}$ )
- ❖ El flujo se debe a una diferencia de presiones constante
- ❖ No se consideran fuerzas externas
- ❖ Simetría angular
- ❖ Flujo completamente desarrollado

• **Ecuaciones gobernantes**

*Ecuación de continuidad para coordenadas cilíndricas:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z)$$

Aplicando las suposiciones queda:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

*Ecuación de conservación de movimiento en coordenadas cilíndricas en dirección z para un fluido incompresible y newtoniano:*

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z$$

Aplicando las suposiciones queda:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]$$

Como la velocidad en dirección z, solo depende del radio, podemos reescribirla como:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]$$

Ambas ecuaciones son válidas para nuestro dominio ( $0 \leq r \leq R$ ).

• **Condiciones de frontera**

CF1. En  $r = 0$ , por condición de simetría:

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0$$

CF2. En  $r = R$ , por condición de no deslizamiento:

$$v_z = 0$$

- **Condiciones iniciales**

Es estado estacionario, no requiere condiciones iniciales.

- **Materiales (propiedades)**

La Tabla 1 muestra las propiedades de 3 materiales que se pueden evaluar, en principio no hay restricción mientras el fluido sea incompresible y newtoniano.

Tabla 1.- Propiedades de los materiales

Material	$\rho$ [kg m <sup>-3</sup> ]	$\mu$ [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
Agua	1000	0.001
Acero fundido	7100	0.0065
Vidrio fundido	3000	10

➤ **Metodología de solución**

- **Resolución matemática analítica del sistema de ecuaciones.**

Comencemos por la ecuación de conservación de movimiento:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]$$

Si consideramos  $\frac{\partial P}{\partial z}$  como constante:

$$\left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \left( \frac{r}{\mu} \right) = \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv_z}{dr} \right)$$

Integrando una primera vez:

$$\int \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \left( \frac{r}{\mu} \right) dr = \int d \left( r \frac{dv_z}{dr} \right)$$

$$\left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \left( \frac{r^2}{2\mu} \right) = r \frac{dv_z}{dr} + c_1$$

Aplicando la CF1:

$$\left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \left( \frac{(0)^2}{2\mu} \right) = (0)(0) + c_1$$

$$c_1 = 0$$

Sustituyendo llegamos a:

$$\left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \left( \frac{r}{2\mu} \right) = \frac{dv_z}{dr}$$

Volvemos a integrar:

$$\int \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) \left( \frac{r}{2\mu} \right) dr = \int dv_z$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)\left(\frac{r^2}{4\mu}\right) = v_z + c_2$$

Aplicando la CF2:

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)\left(\frac{R^2}{4\mu}\right) &= (0) + c_2 \\ c_2 &= \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)\left(\frac{R^2}{4\mu}\right)\end{aligned}$$

Sustituyendo llegamos a una expresión que describe el movimiento del fluido en dirección (z) en función de la posición radial (r):

$$v_z = \left(\frac{1}{4\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)(r^2 - R^2)$$

La velocidad máxima se ubica en el punto donde la derivada de la función es igual a cero, en este sistema en particular coincide con una de las condiciones de frontera, por lo que se ubica en  $r=0$ , quedando:

$$v_{z,max} = \left(\frac{-R^2}{4\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)$$

El flujo volumétrico está dado por:

$$\begin{aligned}Q &= \int_0^R v_z(r) 2\pi r dr = \int_0^R \left(\left(\frac{1}{4\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)(r^2 - R^2)\right) 2\pi r dr = \left(\frac{\pi}{2\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right) \int_0^R (r^3 - rR^2) dr \\ &= \left(\frac{\pi}{2\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)\left(\frac{r^4}{4} - \frac{r^2}{2}R^2\right)_0^R = \left(\frac{\pi}{2\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)\left(\frac{R^4}{4} - \frac{R^4}{2} - \left(\frac{0^4}{4} - \frac{0^2}{2}R^2\right)\right) \\ &= \left(\frac{\pi}{2\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)\left(\frac{R^4}{4} - \frac{R^4}{2}\right) = -\left(\frac{\pi R^4}{8\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)\end{aligned}$$

Finalmente la velocidad media está dada por:

$$\bar{v}_z = \frac{\int_0^R v_z(r) 2\pi r dr}{\int_0^R 2\pi r dr} = \frac{-\left(\frac{\pi R^4}{8\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)}{\pi r^2 \Big|_0^R} = \frac{-\left(\frac{\pi R^4}{8\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)}{\pi R^2} = -\left(\frac{R^2}{8\mu}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)$$

- **Resolución empleando software CFD**

Lo primero es abrir la aplicación Workbench que se encuentra en la carpeta de ANSYS dentro del menú de aplicaciones, este es el espacio de trabajo que administra los softwares que componen la paquetería ANSYS. Para realizar esta guía se empleó la **versión 18.2 de la paquetera ANSYS**, las ventanas pueden variar dependiendo de la versión utilizada pero la base del uso es la misma.

Para trabajar en workbench hay dos opciones:

Seleccionar individualmente los componentes de un sistema de análisis o bien trabajar un sistema de análisis preestablecido de ANSYS (ver Figura 4).

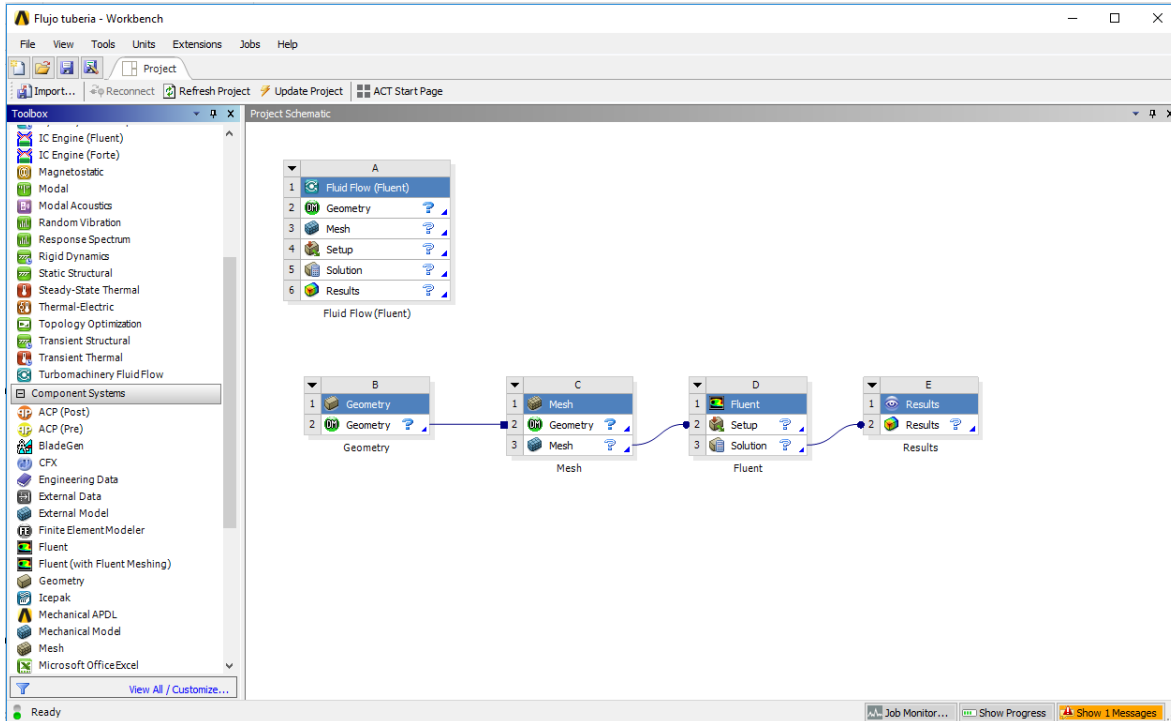


Figura 4.- Formas de acomodar los componentes de un sistema en ANSYS Workbench.

Es importante señalar que cuando se guarde un trabajo es necesario que no haya acentos o caracteres extraños en la ruta de acceso al archivo, ni en el archivo mismo.

### *Pre-procesamiento*

Lo primero es dibujar el sistema (previamente descrito y definido durante el planteamiento del problema). Para dibujar la geometría ANSYS presenta dos opciones, SpaceClaim (nuevo) y DesignModeler (establecido en versiones anteriores), para este caso se utilizará DesignModeler, para cambiar entre ambas opciones basta con hacer click derecho en el componente Geometry y seleccionar la que se utilizar (ver Figura 5).

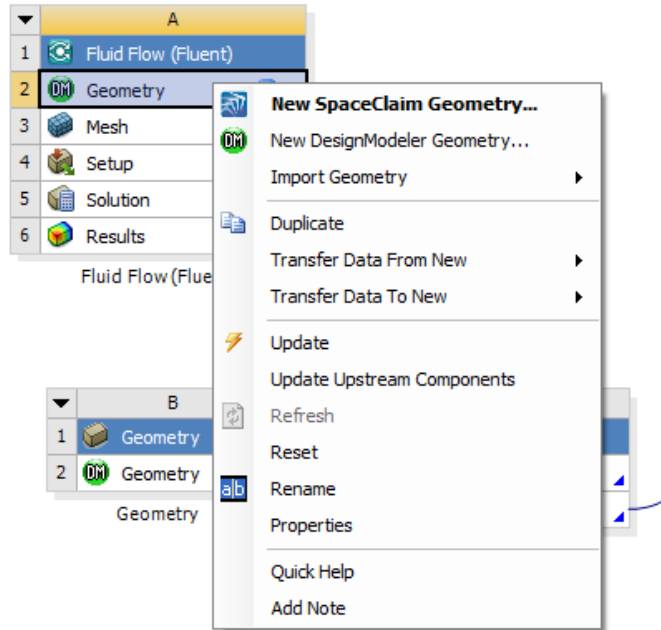


Figura 5.- Selección del software para dibujar la geometría.

Una vez seleccionado el software se abrirá la ventana de DesignModeler (ver Figura 6) en la cual se aprecian varios elementos: un espacio de trabajo con un eje coordenado, un árbol de diseño, diversas barras de herramientas y herramientas de acceso rápido.

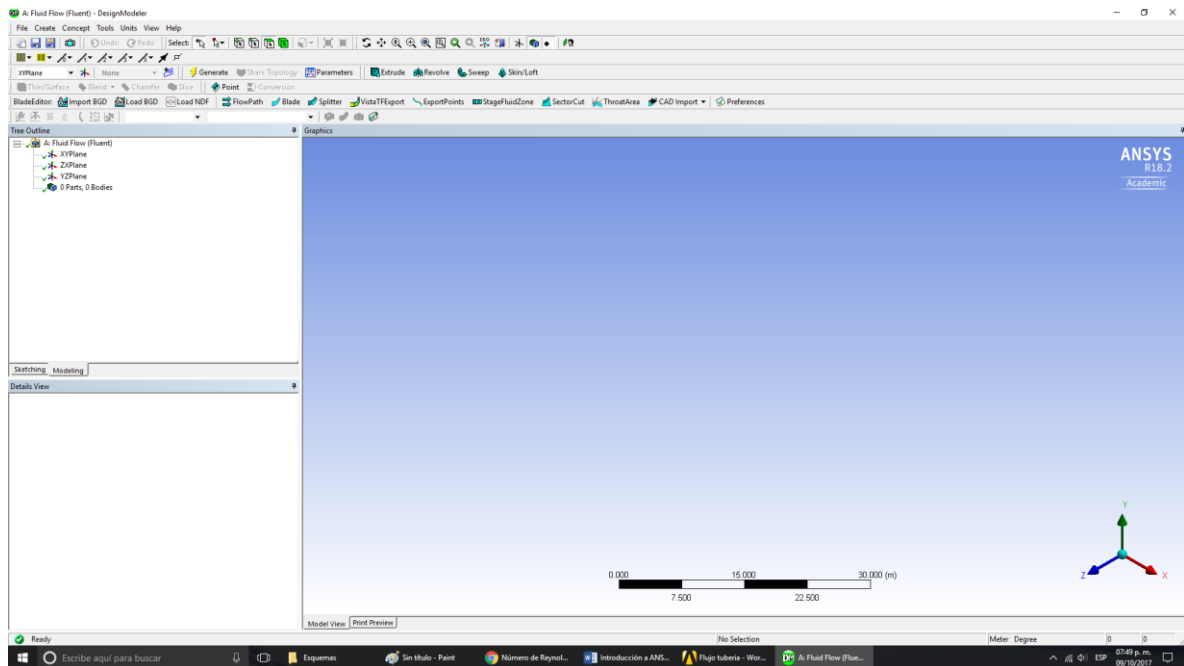


Figura 6.- Ventana de ANSYS DesignModeler.



En este caso se quiere trabajar con un modelo axisimétrico, es decir, vamos a trabajar el modelo 3D considerando que hay simetría angular, por lo que basta con dibujar un corte en 2D. Empezaremos por posicionarnos en el plano xy y seleccionamos agregar un nuevo sketch desde el icono correspondiente (ver Figura 7).

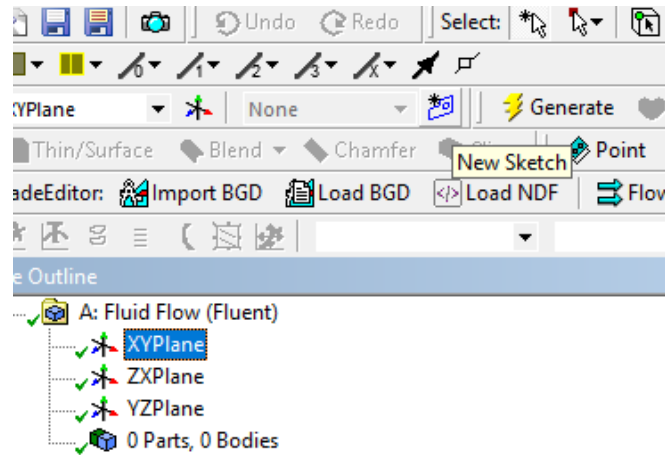


Figura 7.- agregar un nuevo sketch en el plano xy.

Una vez agregado, se podrá observar en el árbol de creación que se tiene un nuevo sketch, para trabajar con el mismo basta con seleccionarlo y moverse a la pestaña sketching (ver Figura 8) en lugar de modeling (esta es la que muestra el árbol).

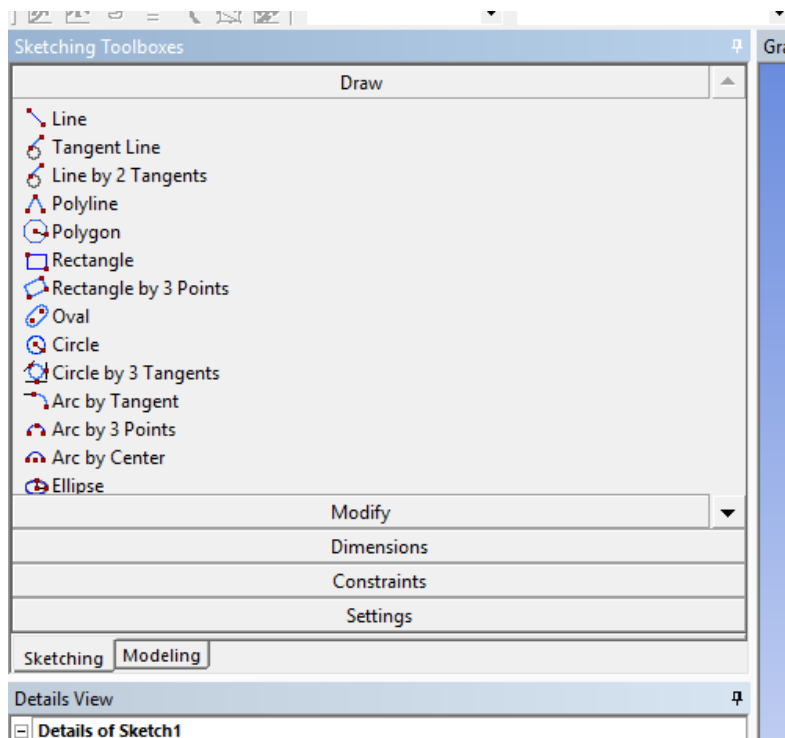


Figura 8.- Opciones de la pestaña sketching.

Seleccionamos la opción de rectangle del menú Draw de la pestaña sketching, y posicionándonos en el centro de nuestro eje (marcado por una P) dibujamos el rectángulo de las dimensiones que nos parezca mejor (ver Figura 9). Las unidades por default son m, si se requieren cambiar se puede hacer desde la barra de herramientas en units.

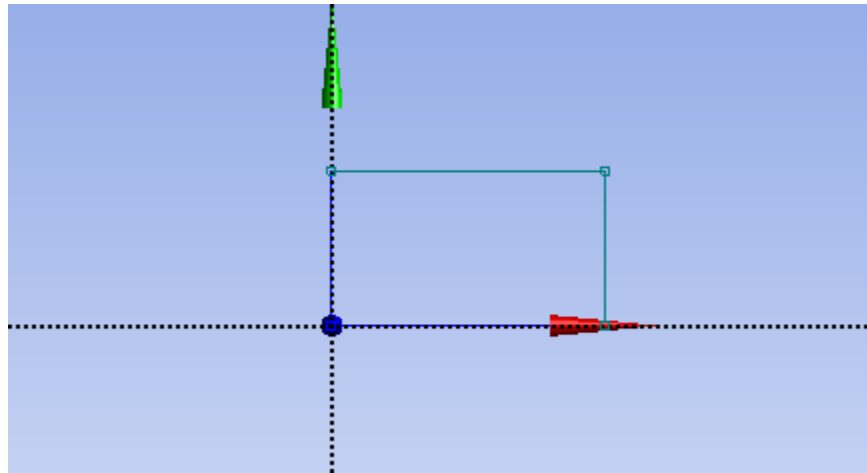


Figura 9.- dibujo del rectángulo.

Posteriormente seleccionamos el menú dimensions que por default tiene la opción general, posicionándonos en los ejes y arrastrando podemos agregar las dimensiones deseadas, para este caso vamos a agregar dimensiones en el eje x y y del rectángulo dibujado (Figura 10).

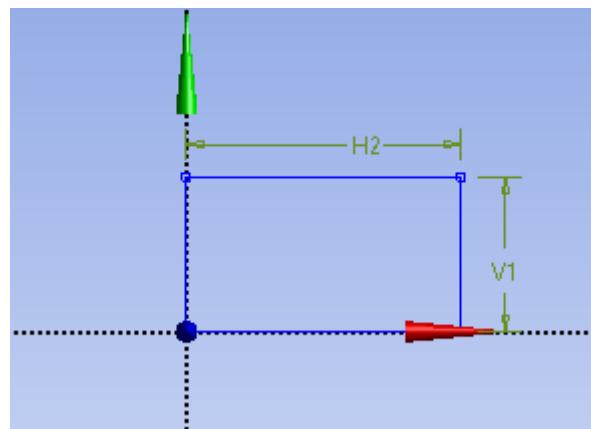


Figura 10.- Dimensiones en el rectángulo (H por horizontal y V por vertical).

Las dimensiones agregadas aparecerán en la ventana detalles, sobre esta se puede redimensionar el rectángulo, en nuestro caso serán 0.015m de la dimensión V y 1.5m de la dimensión H, con lo cual el rectángulo modificará su tamaño (Figura 11).

Nótese que en este caso se dio una longitud muy larga a la tubería, esto es con la finalidad de que el flujo se desarrolle completamente, lo ideal es emplear **CONDICIONES DE FRONTERA PERIODICAS**, pero dado que es un trabajo introductorio es más sencillo considerar una tubería larga.

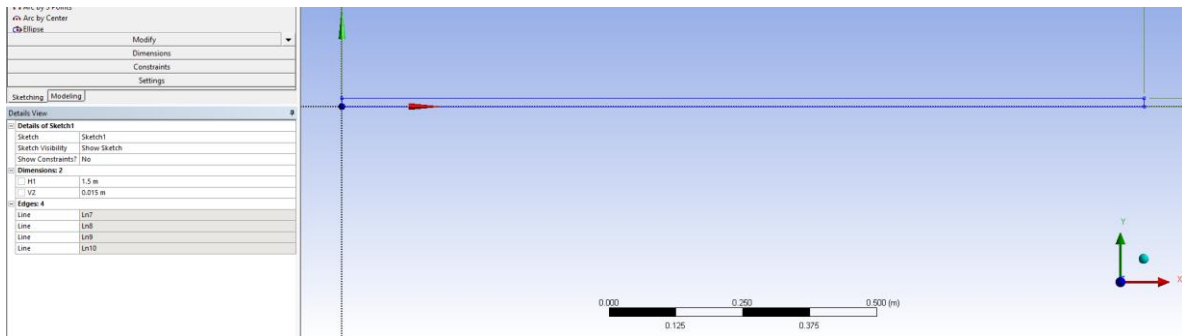


Figura 11.- dimensiones del rectángulo dibujado.

Una vez que el sketch está correcto, se debe generar un cuerpo sólido, en este caso una superficie, para ello se usa la opción Surface from sketches del menú concept de la barra de herramientas (ver Figura 12). Damos aceptar a la selección del sketch1 y luego al botón generate (ver Figura 12) con lo cual obtendremos el cuerpo sólido presentado en la Figura 13.

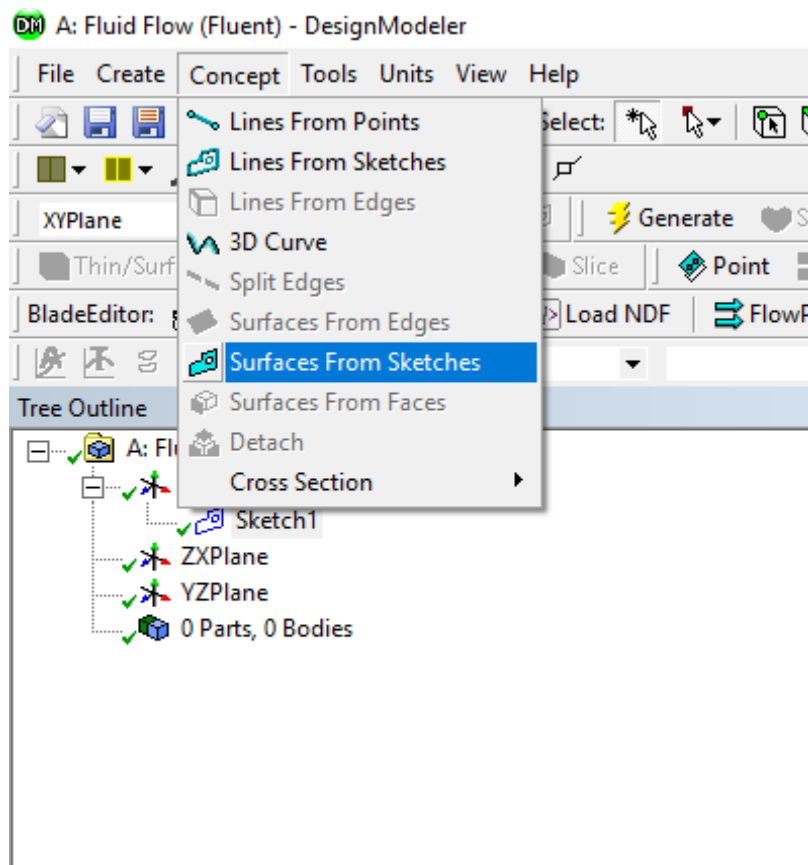


Figura 12.- Creación de una superficie desde el sketch.

Lo último que falta para obtener nuestro cuerpo es ir al árbol de diseño y seleccionar el cuerpo de superficie, cambiamos el tipo a fluido (ver Figura 13) y podemos cerrar el DesignModeler. Procura guardar tu trabajo de manera constante.

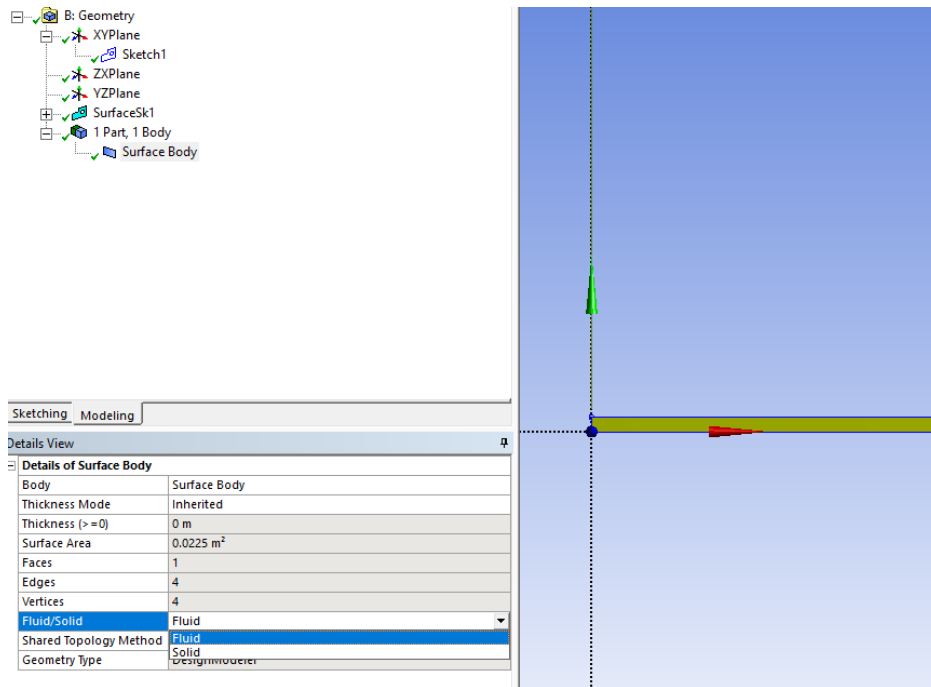


Figura 13.- Cuerpo de superficie generado.

Lo siguiente es discretizar el sistema. Para ello se utiliza el programa Meshing de la paquetería ANSYS (en Workbench marcado como Mesh), que debe estar conectado a una geometría, o bien es posible cargar una geometría directamente en el en el caso de ser necesario. La ventana de trabajo presenta una imagen de la geometría diseñada en DesignModeler (ver Figura 14).

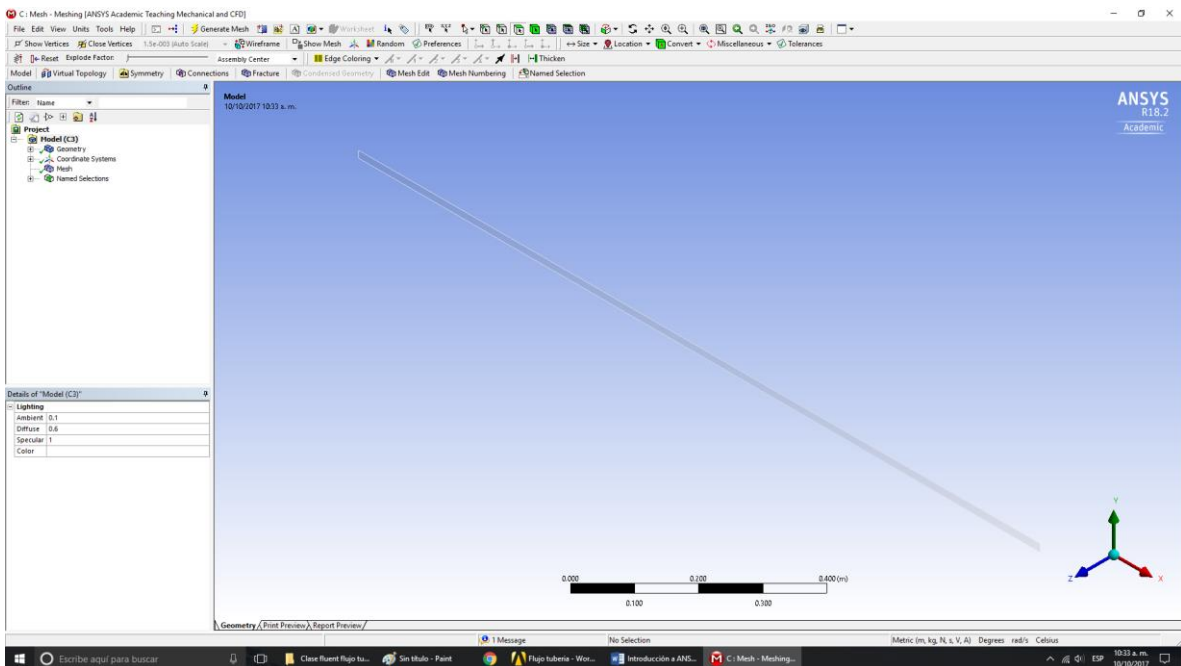


Figura 14.- Ventana del software Meshing, mostrando la geometría generada en DesingModeler.

Lo primero que haremos para generar la malla es usar la herramienta de selección de bordes (líneas) para seleccionar la cara izquierda de la geometría, a esta le daremos click derecho una vez seleccionada y elegiremos la opción Create Name Selection (Figura 15). Le daremos el nombre de inlet, que es un nombre asociado a una entrada de velocidad en Fluent, se puede colocar inlet\_entrada y sigue siendo igualmente reconocible. Repetiremos esto para las demás caras de nuestra geometría, usando los nombres presentados en la Tabla 2.

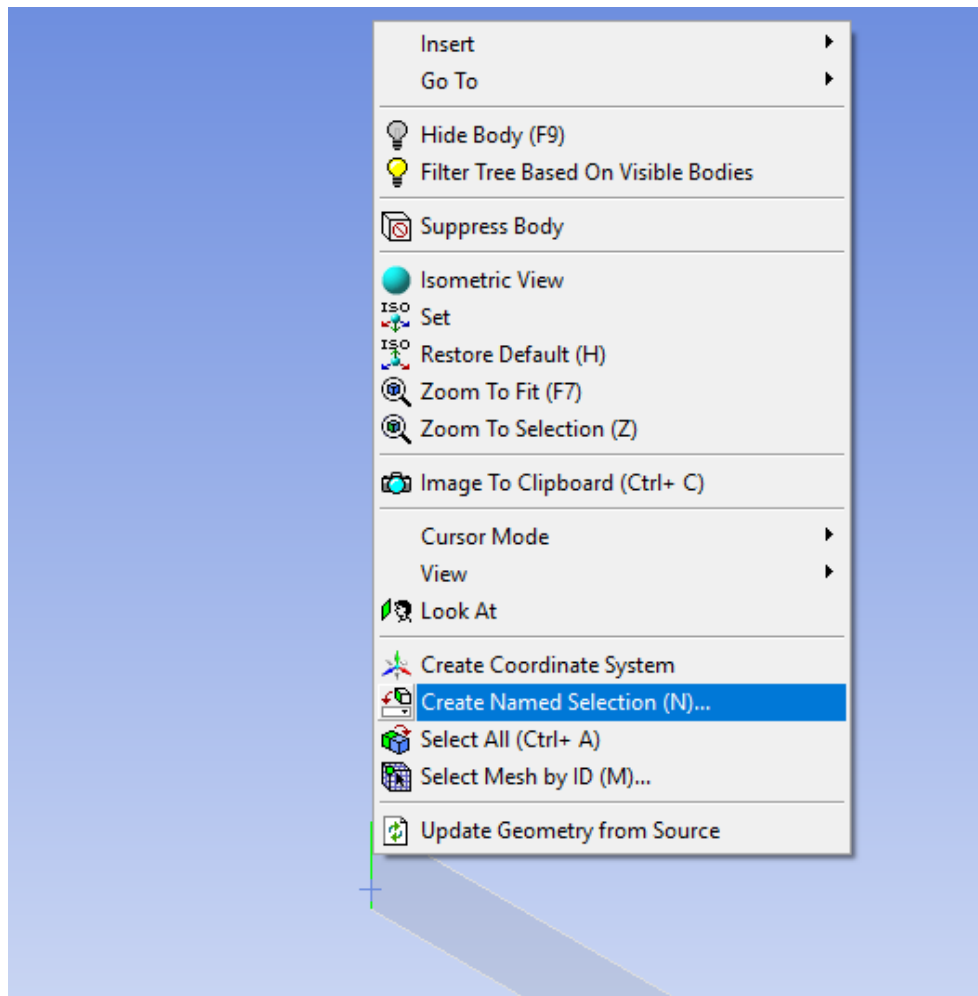


Figura 15.- Cara izquierda seleccionada (verde) sobre la que se selecciona la opción Create Name Selection.

Tabla 2.- Nombres de las fronteras de la geometría.

Frontera/cara	Nombre	Tipo de frontera en Fluent
Izquierda	Inlet o inlet_entrada	Velocity inlet
Derecha	Outlet u outlet_salida	Pressure outlet
Superior	Wall o wall_pared	Wall
Inferior	Axis o axis_eje	Axis (solo en axisymmetric)

Una vez generados los nombres de las fronteras le damos dimensiones a la malla, para ello seleccionamos en el árbol de creación el elemento mesh, para este caso solo modificaremos las opciones de las pestañas Defaults y Sizing de los detalles del elemento Mesh, como se observa en la Figura 16. Verificamos en Defaults que el Physics Preference sea CFD y que el Solver Preference sea Fluent, además al Relevance le damos el valor de 15. En Sizing cambiamos el Relevance Center a Fine y le damos el valor de 0.00075 al Max Face Size.

Details of "Mesh"	
[-] <b>Display</b>	
Display Style	Body Color
[-] <b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	15
Export Format	Standard
Element Order	Linear
[-] <b>Sizing</b>	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Fine
<input checked="" type="checkbox"/> Max Face Size	0.00075
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (3.75e-006 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.19140 )
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (7.5e-006 m)
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (16.3350 °)
Bounding Box Di...	1.50010 m
Minimum Edge L...	1.5e-002 m
[-] <b>Quality</b>	

Figura 16.- Detalles de Mesh.

Una vez colocadas estas opciones le damos al botón Generate Mesh y tardara unos minutos en obtener la malla bajo las condiciones que se le requirieron. Podemos verificar la calidad de la misma en la pestaña de Quality, en este caso la ortogonalidad es muy cercana a 1, por lo que la malla tiene buena calidad. En la pestaña statistics podemos ver que consta de aproximadamente 42021 nodos (ver Fig. 17). Si nos acercamos a la malla observaremos que está compuesta casi exclusivamente de elementos cuadrados. Con esto damos por concluida la discretización del sistema y podemos cerrar el programa Meshing.

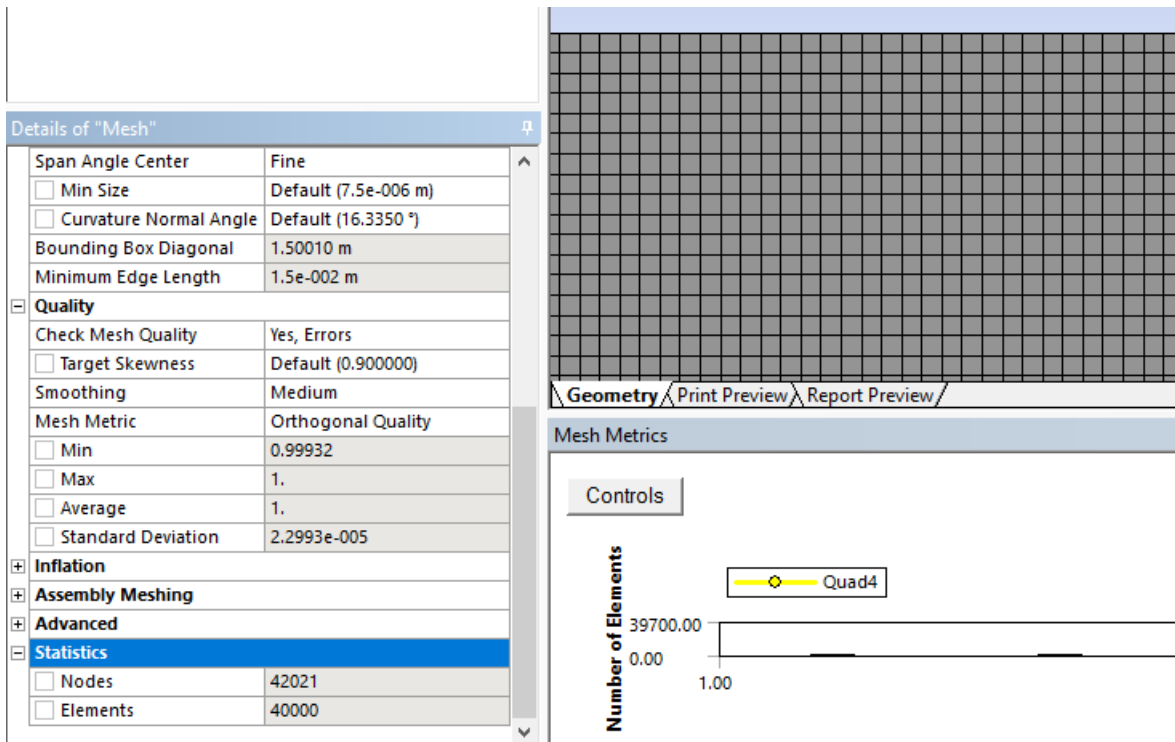


Figura 17.- Detalles de la malla.

### Procesamiento

Una vez finalizada la discretización del sistema procedemos a realizar el procesamiento, para esto en workbench hacemos update al elemento Mesh de nuestro sistema y cargamos el siguiente elemento que es el Setup como se observa en la Figura 18.

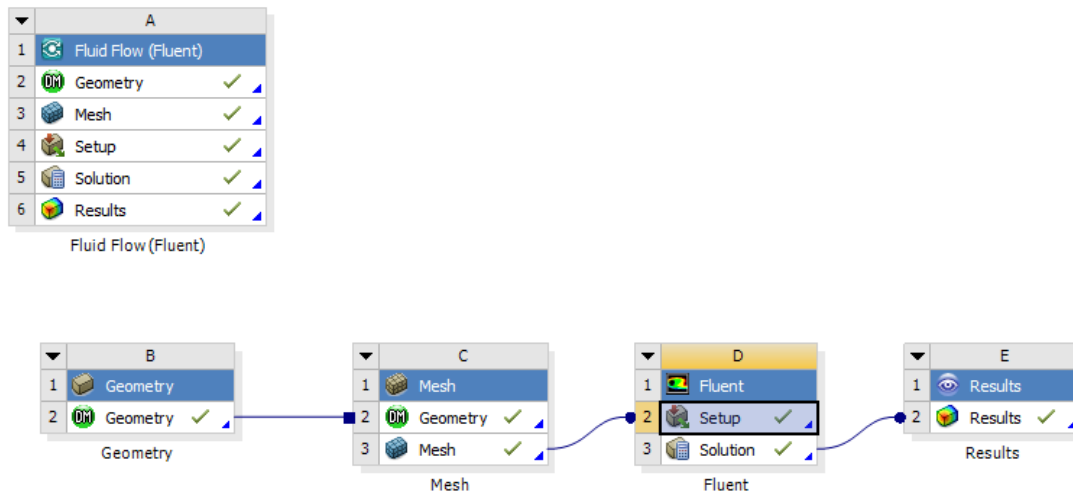


Figura 18.- Sistemas CFD generados en Workbench con la opción setup seleccionada.

Este abrirá la ventana correspondiente (Figura 19), en este caso, al ser una geometría bidimensional las opciones de Dimension vienen bloqueadas en 2D. Damos click en Ok y abrirá la ventana de Fluent.

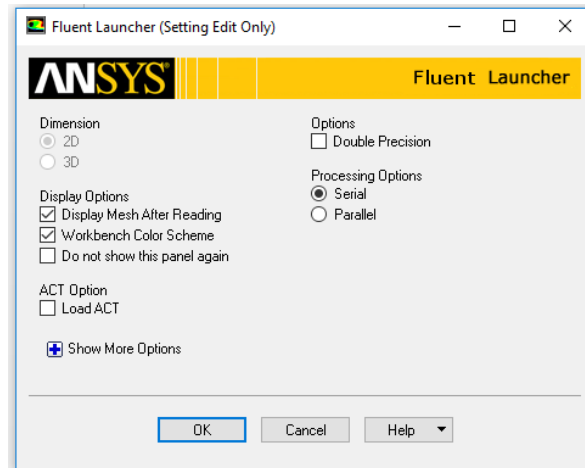


Figura 19.- Fluent launcher (setup).

Tras lanzar Fluent, veremos la ventana presentada en la Figura 20, nótese que marca una advertencia para cambiar el tipo de problema a axisymmetric debido a la nomenclatura de las fronteras. En esta se tienen como elementos una ventana de visualización que presenta la geometría, un árbol de trabajo que tiene en orden los pasos para establecer las condiciones de nuestro modelo y diversas barras de herramientas en la parte superior.

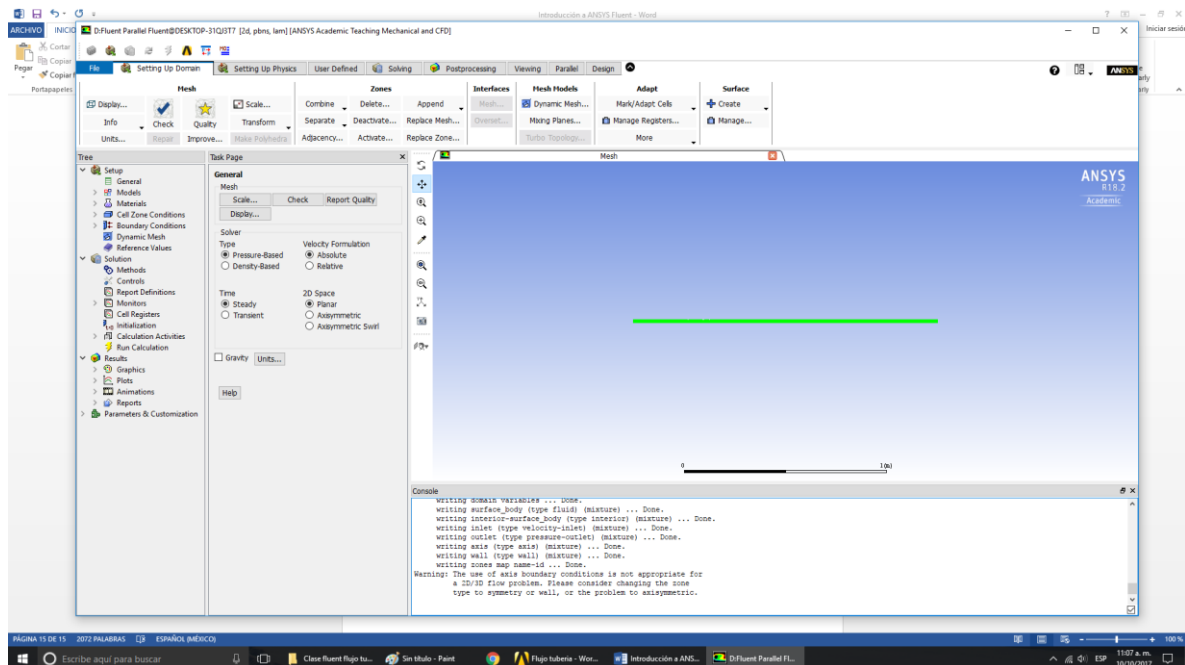


Figura 20.- Ventana de Fluent mostrando el sistema discretizado.

Para comenzar hacemos la recomendación que nos indica y establecemos en General que el espacio 2D es axisymmetric. En modelos por default solo está activo el Viscous (Laminar) que es justo el que



se necesita para nuestro sistema al estar en régimen laminar. En materiales viene aire como fluido y aluminio como sólido, el sólido no importa pero el aire hay que cambiarlo, para eso hacemos doble click sobre el aire y abrimos la ventana de materiales que se presenta en la Figura 21. Cambiamos el nombre a agua y colocamos las propiedades establecidas en la Tabla 1, finalizamos dando click en Change/create y confirmamos el cuadro de texto adicional.

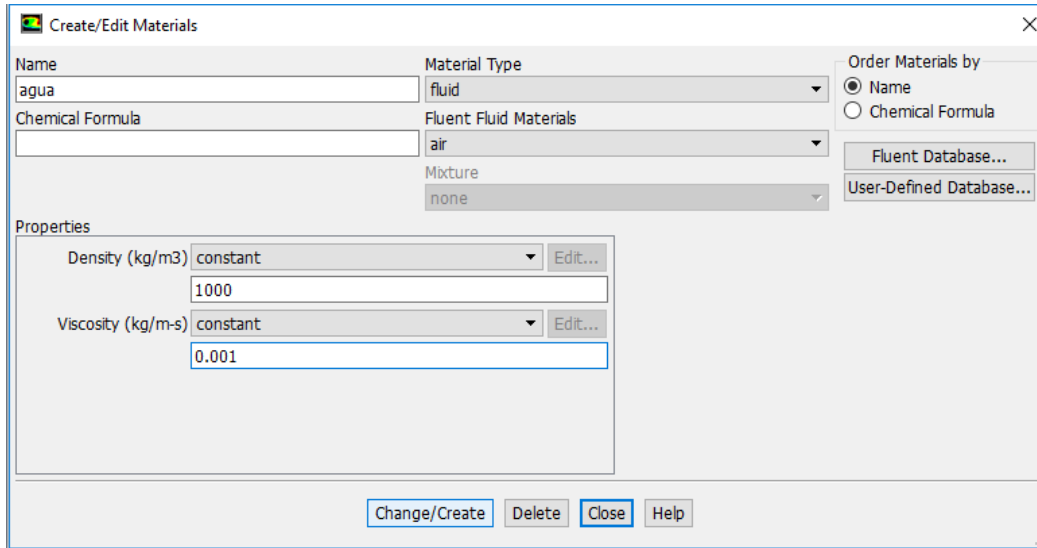


Figura 21.- Ventana de creación/edición de materiales.

Vamos a la pestaña de Boundary Conditions y verificamos que todas sean concordantes con la Tabla 2. La única frontera que modificamos es el inlet a la que colocamos una magnitud de velocidad de 0.0354 m/s y confirmamos (ver Figura 22).

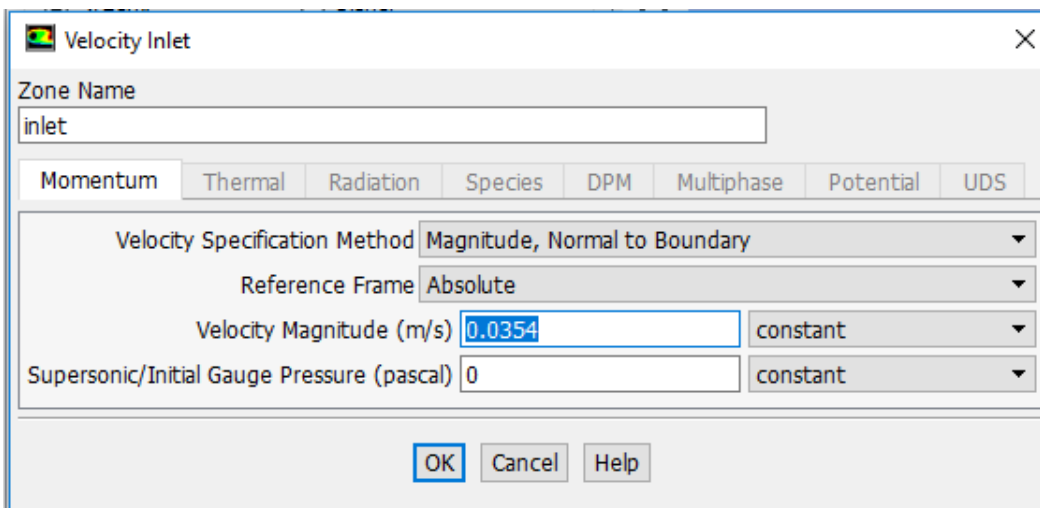


Figura 22.- Opciones del Velocity Inlet (frontera Inlet).

En solution solo nos vamos a Initialization y le damos click al botón Initialize. Y en Run Calculation le damos 2500 iteraciones y le damos al botón Calculate, tras lo cual el caso comenzará a correr (ver Fig. 23). En la pantalla de visualización se observa una gráfica de los residuales y en la parte inferior

se mostrarán los valores correspondientes, el caso continuará el cálculo hasta que finalicen las iteraciones o bien que se alcance el criterio de convergencia (por default  $10^{-3}$  en la ecuación de continuidad). Una vez finalizado el cálculo se puede cerrar la ventana de Fluent.

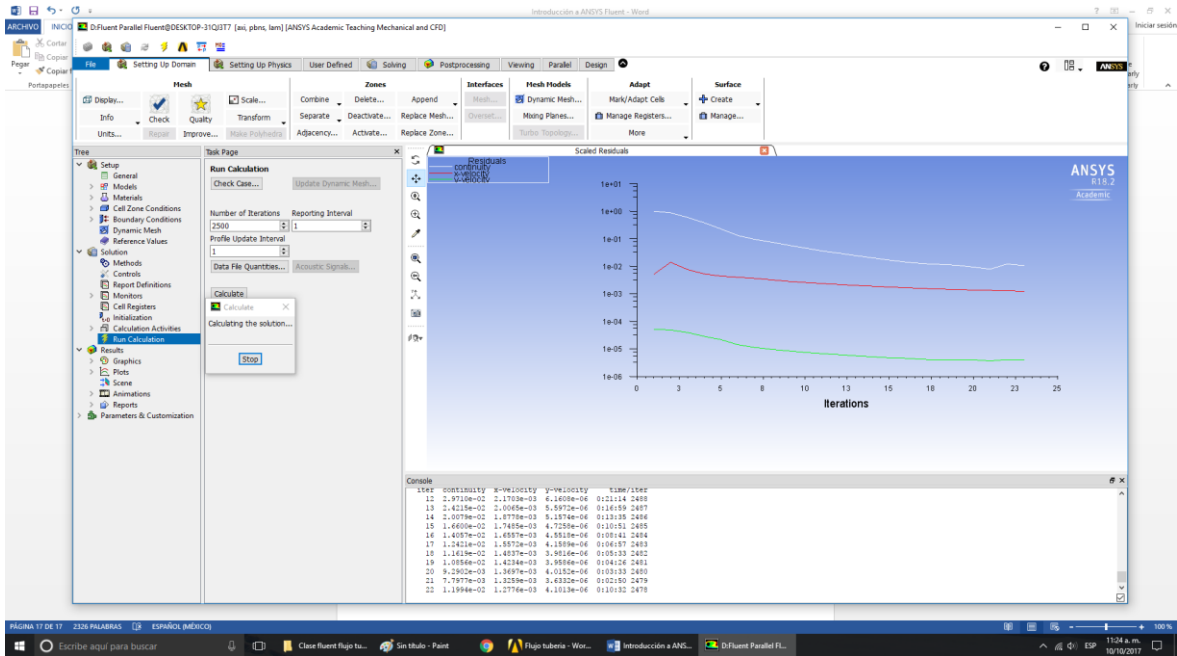


Figura 23.- Residuales en la pantalla de visualización mientras corre el caso.

### Post-procesamiento

Para el post-procesamiento se debe acceder a la aplicación Results mostrada en el espacio de trabajo en Workbench (ver Figura 17), esta abrirá el CFD-Post que es el programa en el que se realizará el procesamiento de los resultados. La obtención de los mismos se discutirá en la sección siguiente.

#### ➤ Resultados

En el caso de la solución analítica sabemos que  $Q = 1.5\text{ lpm}$  que son  $0.000025\text{ m}^3/\text{s}$ . Sabiendo que el área transversal es de  $0.000225\text{ m}^2$ , se obtiene que la velocidad media de nuestro sistema será de  $0.0354\text{ m/s}$ , esta es la condición de entrada que le dimos a la frontera Inlet en Fluent.

El Reynolds del sistema es de 1062, con lo cual sabemos que entra dentro de un régimen laminar.

Finalmente se puede calcular el valor de  $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)$  que es de  $-1.2587\text{ Pa/m}$ .

Con estos datos y la ecuación que se obtuvo de la solución analítica se puede obtener el patrón de flujo que presenta el fluido, el cual se muestra en la Figura 24.

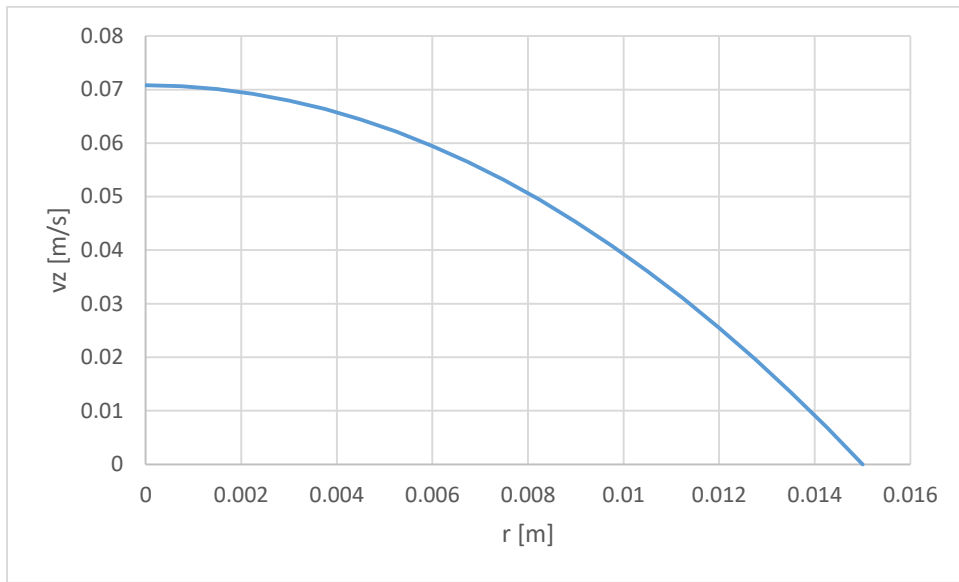


Figura 24.- Patrón de flujo obtenido de la solución analítica.

Ahora bien para obtener los datos de la simulación de Fluent abriremos el programa CFD- Post que debe estar anclado a la solución en el entorno de Workbench (ver Figura 17). Esto abrirá la ventana que se muestra en la Figura 25.

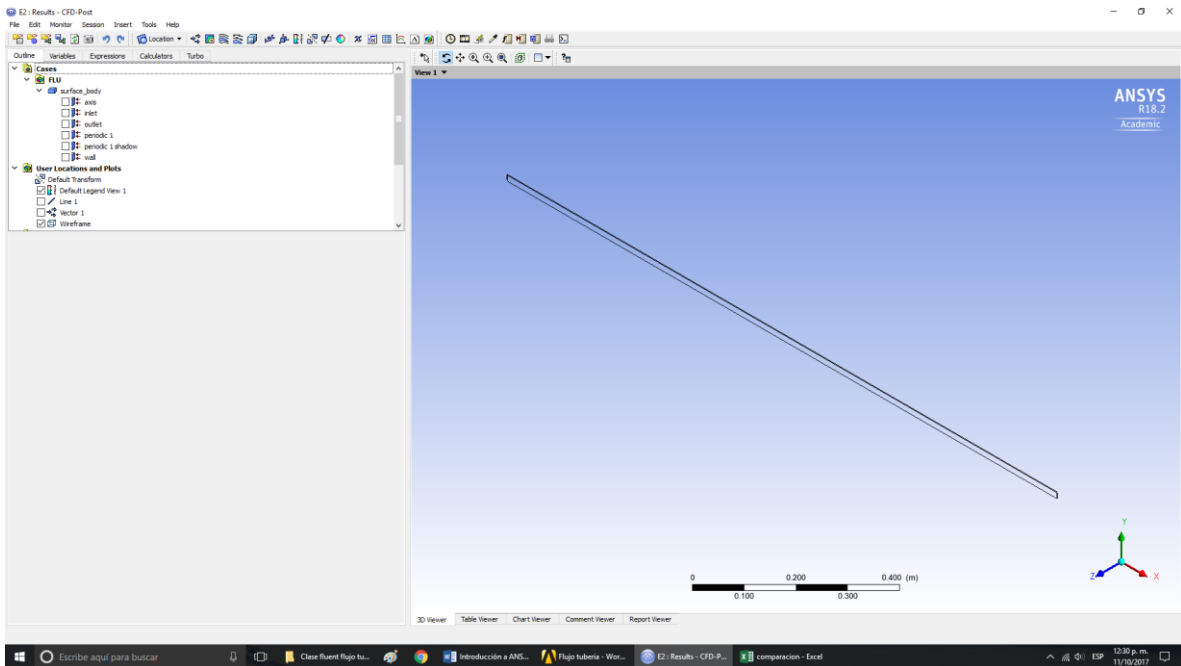


Figura 25.- Ventana del programa CFD-Post.

Comenzaremos colocando unos vectores de velocidad, para ello seleccionamos la opción vectores en la barra de herramientas y en la parte de location colocaremos la ubicación periodic 1 que corresponde

a un plano  $zr$  ya que el sistema tiene simetría angular (ver Figura 26), las demás opciones se dejen como están preestablecidas. Esto nos mostrará los vectores que se muestran en la Figura 27.

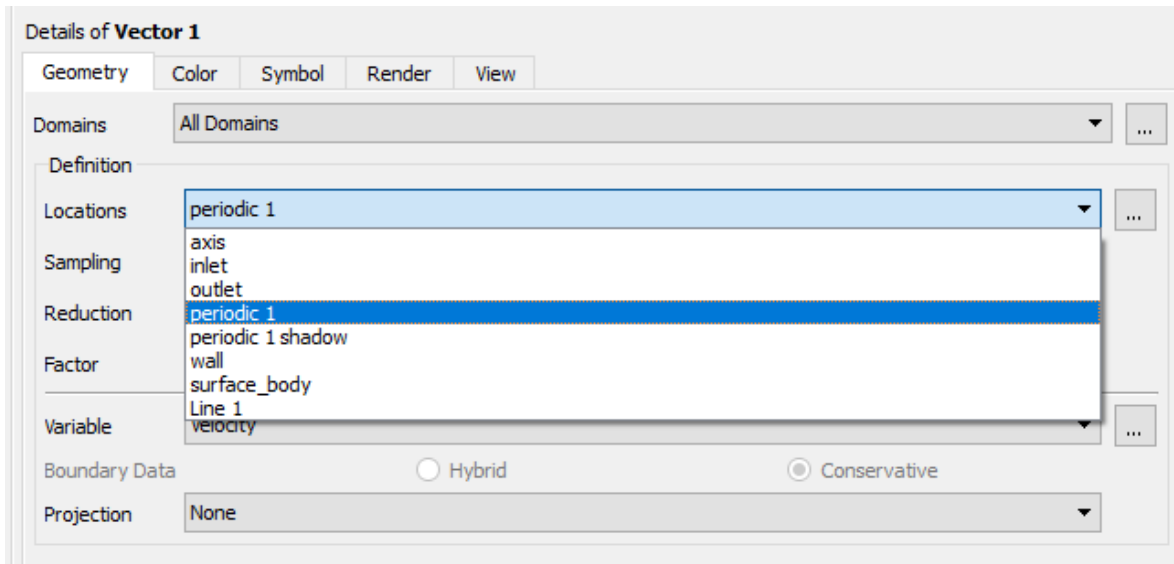


Figura 26.- Selección de la ubicación de los vectores.



Figura 27.- Vectores de velocidad del sistema.

Con la barra de visualización podemos observar estos vectores de manera más cercana, tal como se ve en la Figura 28, en esta se aprecia que el perfil de velocidad obtenido es parabólico. También debe observarse que al ser el modelo 2D axisymmetric la geometría cargada es como una rebanada del tubo, esto para denotar que hay periodicidad en la misma.

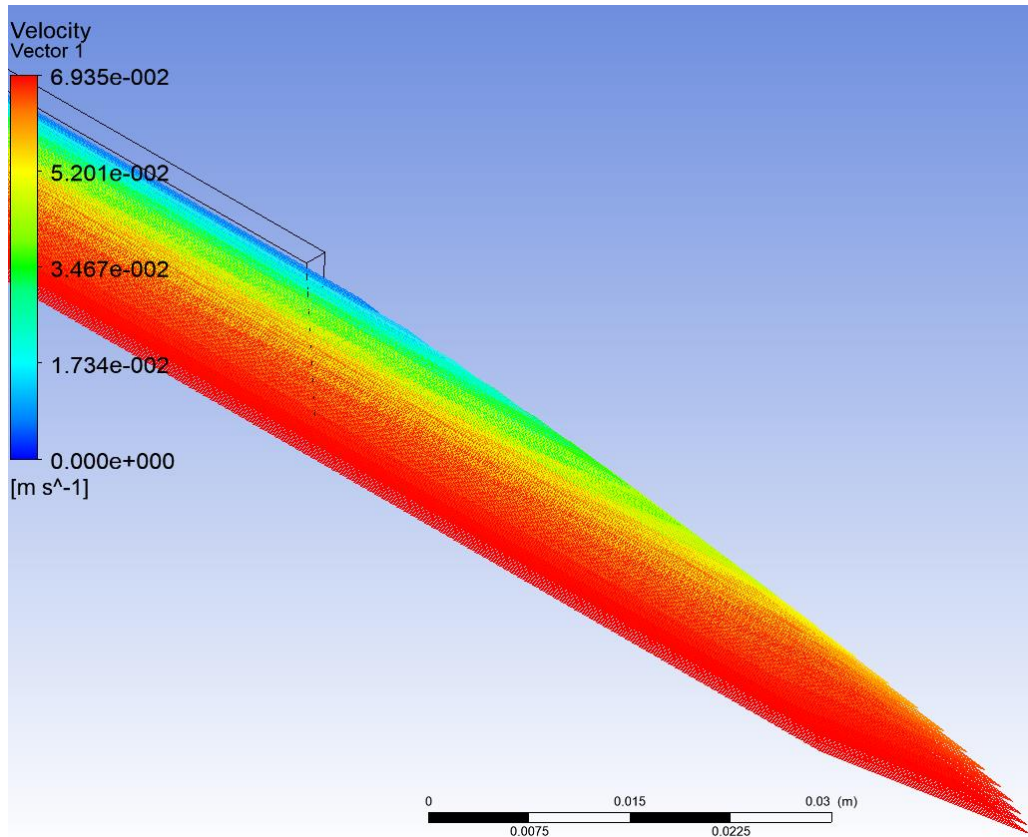


Figura 28.- Acercamiento a los vectores de velocidad.

Para obtener datos numéricos de la velocidad trazaremos una línea en nuestro sistema (sobre la cual obtendremos los datos). Para ello en la barra de herramientas seleccionamos la opción location y luego line, la cual trazaremos con las opciones mostradas en la Figura 29. En esta misma figura se ve la línea que se trazó, en todo momento en CFD-Post se pueden ocultar o mostrar los elementos que se han generado palomeando el elemento en el árbol de creación.

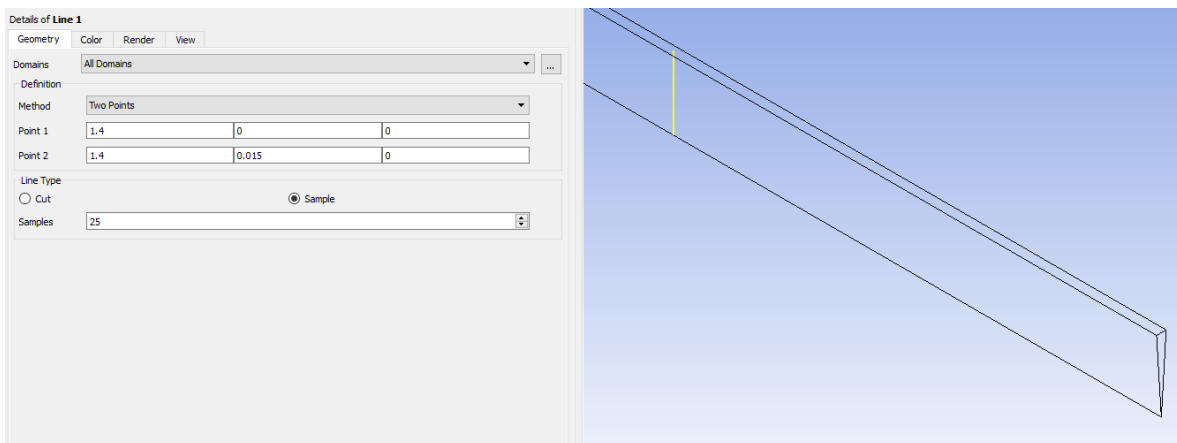


Figura 29.- Línea generada con los detalles que se muestran.

Sobre esta línea en  $r$  (y en el sistema coordenado del CFD-Post) obtendremos los valores de la velocidad en  $z$  ( $x$  en el sistema coordenado del CFD-Post) para ello seleccionamos la opción Chart en la barra de herramientas. A esta le daremos en la pestaña de Data Series como location la línea que creamos (Line 1). En la pestaña de x axis seleccionamos  $Y$  como nuestra variable (que es  $r$ ) y en la de y axis Velocity  $u$  (que es la velocidad en  $z$ ). Tras estas selecciones damos click en Apply y generará la gráfica mostrada en la Figura 30.

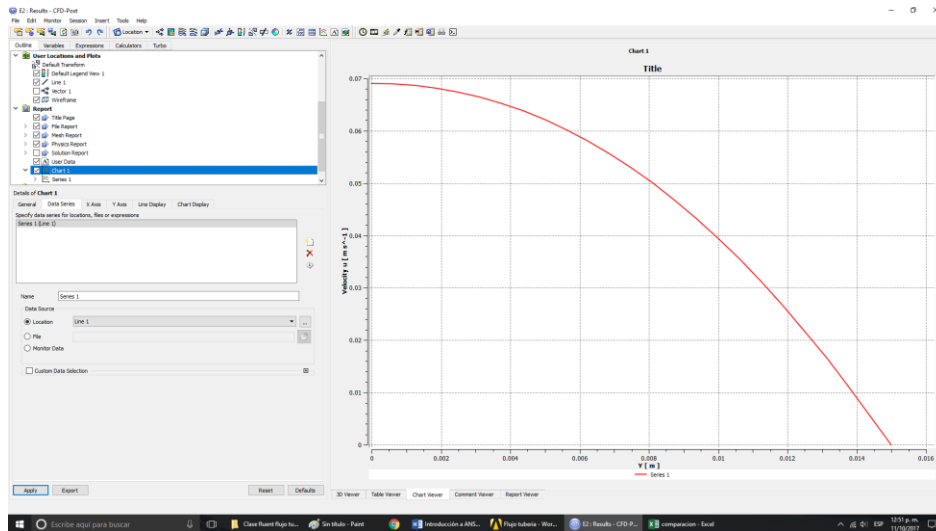


Figura 30.- Gráfica de velocidad en  $z$  [m/s] contra la posición radial [m] generada en CFD-Post.

Finalmente damos click en la opción export para exportar nuestros datos generados, esto los exportará en un archivo .csv que es compatible con el programa Microsoft Excel. Si comparamos estos datos con la solución analítica (Figura 31) vemos que se aproximan bastante bien.

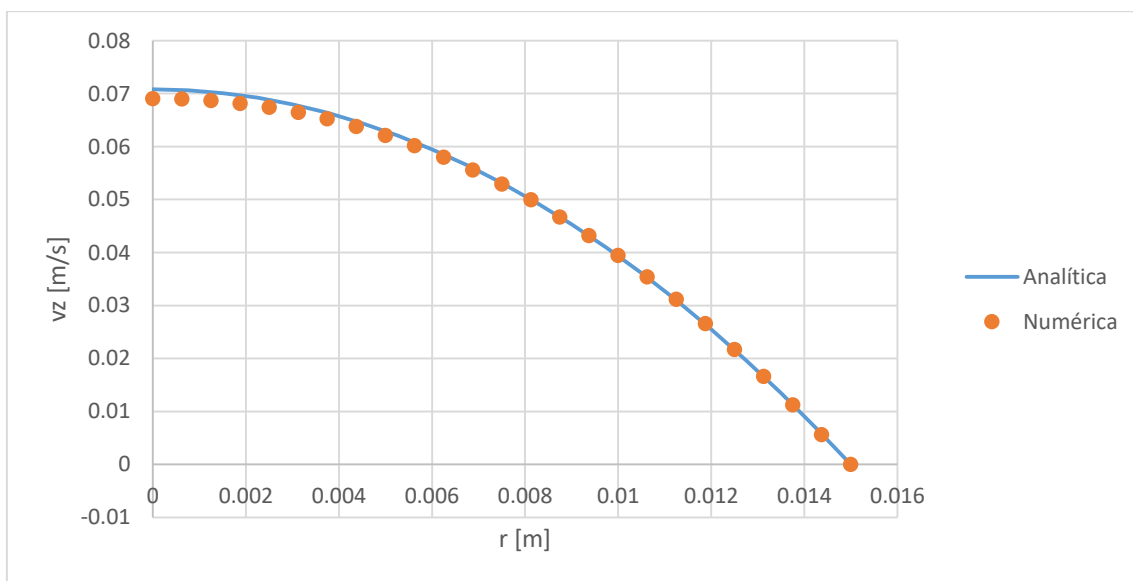


Figura 31.- Comparación de la solución analítica con la numérica.

Como ejercicio adicional se pueden obtener los resultados para el resto de los materiales mostrados en la Tabla 1 y compararlos entre sí.