



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE PILARES EN LA SOCAVACIÓN DEL CAUCE

Paul Jaramillo-Mejía

Piura, agosto de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Jaramillo, P. (2017). *Evaluación del efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce* (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



“Evaluación del efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Paul Junior Jaramillo Mejía

Asesor: Dr. Jorge D. Reyes Salazar

Piura, Agosto 2017

A Dios y la Virgen María Auxiliadora; a mi familia, en especial a mis padres, Clara e Hipólito, quienes siempre se esforzaron por darme la mejor educación y enseñarme las buenas virtudes y valores, para poder ser una gran persona y profesional.

Prólogo

El puente es una estructura cuya principal importancia es la conexión de dos lugares separados por un río. Uno de los elementos que conforman el puente es el pilar y su principal función es recibir las cargas de compresión y transmitir las al terreno. Al presentarse una avenida, la cual genera altas velocidades, muchos factores pueden causar la falla estructural del puente y el más lesivo es la socavación del cauce alrededor de sus pilares.

La socavación se origina porque el pilar al estar localizado en el sentido de la corriente del río produce perturbaciones en su funcionamiento hidráulico, como por ejemplo, el aumento de la velocidad debido a la pérdida de su sección y además, causa que el flujo aguas arriba este desacoplado del flujo aguas abajo, generando la acción de fenómenos turbulentos alrededor de aquel.

Las numerosas complejidades asociadas con el efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce, se analizan mediante la utilización de fórmulas empíricas y modelos físicos; sin embargo, en los últimos años con la mejora de los algoritmos computacionales se ha hecho posible que existan herramientas de evaluación mediante modelos numéricos; una de aquellas es la metodología CFD¹. CFD puede utilizarse para comprender los complicados campos de flujo alrededor de las estructuras y además, es posible utilizar un modelo a escala completa y proporcionar una gran cantidad de datos, con mayor rentabilidad, flexibilidad y velocidad que la obtenida con los procedimientos experimentales.

En base a lo expuesto, la presente tesis, se enfocará en evaluar el efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce utilizando el software de modelación numérica ANSYS CFX.

Agradezco el apoyo de mi asesor, el Dr. Jorge. D. Reyes Salazar, quien siempre tuvo la disposición de participar de la investigación y poder brindarme todas las herramientas para poder desarrollarla.

Finalmente, hago especial mención a mi novia Reyna Huertas Rivera, a quien agradezco el constante apoyo emocional para poder concluir la presente tesis.

¹ *Computational fluid Dynamics* (CFD) es una metodología adoptada para resolver problemas de flujo de fluidos en la práctica de la ingeniería moderna.

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo principal evaluar el efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce. De todas las geometrías, se utilizan dos pilares cuya longitud varía en su profundidad; el primero, angostamiento en la parte alta y el segundo, angostamiento en la parte baja.

Mediante el software de simulación numérica ANSYS CFX, el cual es tridimensional y tiene la capacidad de proporcionar una visualización detallada y amplia información del comportamiento flujodinámico, se realizó la experimentación del flujo alrededor de cada geometría de pilar dentro de dos escenarios; sin foso de socavación y con foso de socavación, respectivamente.

Concluyéndose, que el modelo numérico logra representar la flujodinámica alrededor de los pilares. Además, se demuestra que el pilar de perfil trapezoidal con base delgada influye más en la socavación del cauce.

Índice General

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 PILARES	3
1.1.1 Definición	3
1.1.2 Tipos de Geometrías.....	3
1.1.2.1 Según la forma.....	3
1.1.2.2 Según la sección transversal	6
1.1.2.3 Según el estrechamiento	7
1.2 EROSIÓN	8
1.2.1 Definición	8
1.2.2 Tipos de Erosión.....	8
1.2.2.1 Clasificación Temporal.....	8
1.2.2.2 Clasificación Espacial	9
1.3 EROSIÓN LOCAL EN PILARES	10
1.3.1 Información General.....	10
1.3.2 Mecanismos	10
1.3.2.1 Incremento de la velocidad.....	10
1.3.2.2 Vórtices.....	11
1.3.3 Cálculo de la profundidad.....	13
CAPÍTULO 2 DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS.....	17
2.1 DEFINICIÓN.....	17
2.1.1 Ventajas	17
2.1.2 Desventajas	18
2.2 ECUACIONES MATEMÁTICAS DE TRANSPORTE.....	18
2.2.1 Transporte de Masa	19
2.2.2 Transporte de Momentum	20
2.2.3 Transporte de Calor	23
2.3 ECUACIONES DE NAVIER STOKES PARA FLUIDOS NEWTONIANOS	23
2.4 ECUACIONES RANS (<i>REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES</i>)	24
2.5 MALLA NUMÉRICA.....	27
2.5.1 Mallas estructuradas	27
2.5.2 Mallas estructuradas multibloque.....	28
2.5.3 Mallas no-estructuradas	29
2.5.4 Mallas híbridas	29
2.6 TURBULENCIA.....	29
2.6.1 Características.....	30
2.6.2 Análisis del flujo turbulento	30
2.6.2.1 RANS (Reynolds Averaged Navier- Stokes)	30
2.6.2.2 LES (Large Eddy Simulation).....	30
2.6.2.3 DNS (Direct Numerical Simulation)	31
2.7 FLUJOS MULTIFASE	31
2.8 MÉTODO NUMÉRICO	32
2.8.1 Método de diferencias finitas	32
2.8.2 Método de volúmenes finitos	32
2.8.3 Método de elementos finitos	32
2.9 SOFTWARES DE MODELACIÓN NUMÉRICA	32
2.9.1 HEC-RAS	33

2.9.2 BRI-STARS	33
2.9.3 FESWMS-2DH.....	33
2.9.4 RMA-2.....	34
2.9.5 RIVER-2D	34
2.9.6 SSIMM	34
2.9.7 ANSYS CFX	35
CAPÍTULO 3 ANSYS CFX.....	37
3.1 INTRODUCCIÓN	37
3.2 ESTRUCTURA DE MODELACIÓN	37
3.2.1 Identificación del problema	38
3.2.1.1 Definir los objetivos	38
3.2.1.2 Identificar el dominio de cálculo	38
3.2.2 Pre proceso	38
3.2.2.1 Geometría	38
3.2.2.2 Malla.....	38
3.2.2.3 Física y configuración del solucionador.....	39
3.2.3 Proceso	39
3.2.4 Post proceso	40
3.3 MÉTODO NUMÉRICO	40
3.4 MODELO DE TURBULENCIA	42
3.5 MODELO MULTIFASE.....	42
3.5.1 Modelo no homogéneo	43
3.5.2 Modelo homogéneo	43
CAPÍTULO 4 INVESTIGACIÓN	45
4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	45
4.2 MODELACIÓN NUMÉRICA	46
4.3 ENSAYO SIN FOSO DE SOCAVACIÓN.....	47
4.3.1 Geometría	47
4.3.1.1 PAB	47
4.3.1.2 PAA	50
4.3.2 Superficies de frontera.....	52
4.3.2.1 PAB	52
4.3.2.2 PAA	54
4.3.3 Mallado.....	56
4.3.3.1 PAB	58
4.3.3.2 PAA	59
4.3.4 Física y Configuración del solucionador.....	60
4.3.4.1 PAB	72
4.3.4.2 PAA	72
4.4 ENSAYO CON FOSO DE SOCAVACIÓN	73
4.4.1 Geometría	73
4.4.1.1 PAB	73
4.4.1.2 PAA	78
4.4.2 Superficies de frontera.....	83
4.4.2.1 PAB	83
4.4.2.2 PAA	84
4.4.3 Mallado.....	86
4.4.3.1 PAB	87
4.4.3.2 PAA	88

4.4.4 Física y configuración del solucionador	89
4.4.4.1 PAB	102
4.4.4.2 PAA	102
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	103
5.1 ENSAYO SIN FOSO DE SOCAVACIÓN	104
5.1.1 PAB	104
5.1.2 PAA	106
5.2 ENSAYO CON FOSO DE SOCAVACIÓN	109
5.2.1 PAB	109
5.2.2 PAA	112
5.3 COMPARACIÓN EN PUNTOS CRÍTICOS	115
5.3.1 Ensayo sin foso de socavación	116
5.3.2 Ensayo con foso de socavación	117
CONCLUSIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	121
ANEXOS	123

Introducción

En el primer capítulo damos una completa información acerca de los tipos de geometrías de pilares y se mencionan los mecanismos que producen el fenómeno de socavación.

En el segundo capítulo, se desarrollan los fundamentos teóricos de la Dinámica de fluidos Computacional y se mencionan algunos softwares de modelación numérica.

En el tercero capítulo, se presenta el software de modelación numérica tridimensional ANSYS CFX, dentro del cual se describe la estructura de modelación, método numérico y modelos matemáticos utilizados en la investigación.

En el cuarto capítulo, se define el problema a simular, geometría, superficies de frontera, mallado y además, la física y configuración del solucionador.

Por último, en el quinto capítulo se presentan los resultados de la simulación de cada ensayo y la interpretación de cada uno de los parámetros mostrados para lograr demostrar que el pilar trapezoidal de base delgada influye más en la socavación del cauce.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Pilares

1.1.1 Definición

El pilar es un elemento que forma parte de la subestructura de puentes o plataformas marinas. Su principal función, es recibir las cargas de compresión y transmitir las al terreno. No están sometidos al empuje de tierra, pero cuando son de gran altura, influye mucho el empuje del viento y del agua.

Una de las estructuras más importantes que se ve amenazada por la inestabilidad de sus pilares son los puentes, ya que al estar localizados en el sentido de la corriente del río, producen perturbaciones en su funcionamiento hidráulico, como por ejemplo, el aumento de la velocidad debido a la pérdida de su sección. Además, causa que el flujo aguas arriba del puente este desacoplado del flujo aguas abajo, generando la acción de fenómenos turbulentos alrededor de aquellos.

1.1.2 Tipos de Geometrías

1.1.2.1 Según la forma

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), en la Guía para Inspección de Puentes del Perú (2016, pág.43), muestra las diferentes formas de pilares que se pueden encontrar en el país. Algunas de ellas:

- a) Pilar en T: Se muestra en la Figura 1.1; el pilar tiene forma de letra T y posee una base superior ancha para poder recibir el peso de las vigas.

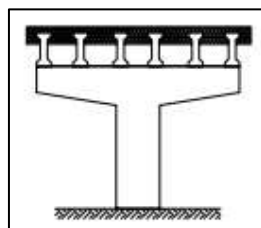


Figura 1. 1 Pilar en T

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones , 2016)

- b) Pilar de 3 Columnas: Se muestra en la Figura 1.2; cada pilar posee sección circular.

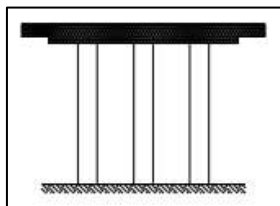


Figura 1. 2 Pilar de 3 Columnas

Fuente: MTC (2006), Guía para inspección de Puentes.

- c) Pilar Muro: Se muestra en la Figura 1.3; es un pilar de cuerpo sólido ancho, el cual posee forma estrecha en la parte superior.

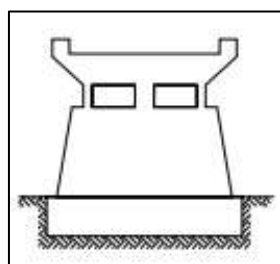


Figura 1. 3 Pilar Muro

Fuente: MTC (2006), Guía para inspección de Puentes.

- d) Pilar Columna: Se muestra en la Figura 1.4; el pilar tiene sección circular constante en profundidad.

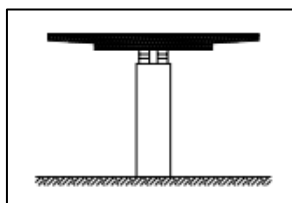


Figura 1. 4 Pilar Columna

Fuente: MTC (2006), Guía para inspección de Puentes.

- e) Pilar Cepa: Se muestra en la Figura 1.5; los pilares tienen terminación en punta en la parte inferior, lo cual les permite lograr una mayor profundización en el suelo.

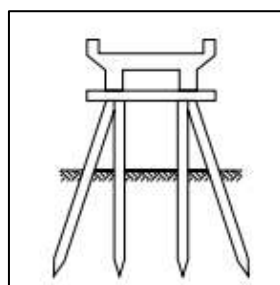


Figura 1. 5 Pilar Cepa

Fuente: MTC (2006), Guía para inspección de Puentes.

- f) Pilar de 2 Columnas: Se muestra en la Figura 1.6; cada pilar tiene sección circular y se unen mediante vigas cajón en su parte superior.

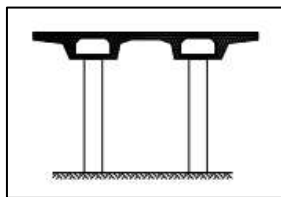


Figura 1. 6 Pilar 2 Columnas

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones , 2016)

- g) Pilar Tipo Placa: Se muestra en la Figura 1.7; el pilar tiene forma estrecha en su inferior. Además, posee viga cajón.



Figura 1. 7 Pilar Tipo Placa

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones , 2016)

- h) Pilar Celosia: Se muestra en la Figura 1.8; es una estructura metálica cuya forma es un entramado.

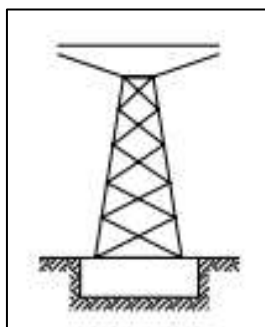


Figura 1. 8 Pilar Celosia

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones , 2016)

- i) Pilar Tipo Pórtico: Se muestra en la Figura 1.9; es una estructura similar a dos pilares en T unidos.

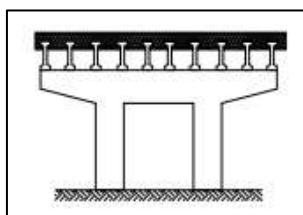


Figura 1. 9 Pilar Tipo Pórtico

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones , 2016)

- j) Pilar en arco: Se muestra en la Figura 1.10; posee acoplamiento entre estructura de concreto en la parte inferior y estructura metálica en forma de arco en la parte superior.

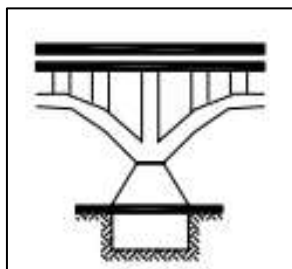


Figura 1. 10 Pilar en arco

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones , 2016)

1.1.2.2 Según la sección transversal

Las formas típicas de sección transversal de pilares uniformes² (Figura 1.11) son las mostradas en la Figura 1.12. La importancia de usar una u otra sección, es que el pilar sea más aerodinámico y tenga una menor dimensión transversal a la corriente, obteniendo como ventaja, reducir la turbulencia y los vórtices.

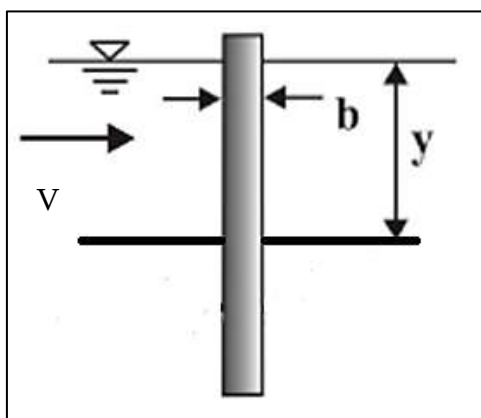


Figura 1. 11 Vista de lateral de Pilar Uniforme
Elaboración: Propia

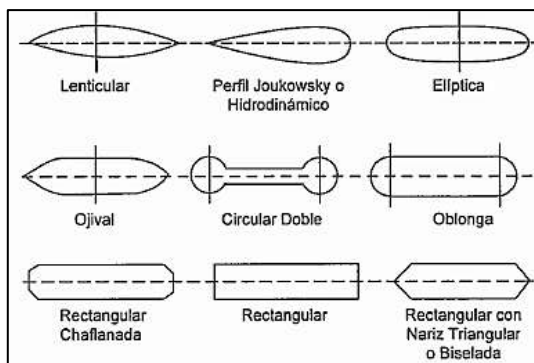


Figura 1. 12 Formas usuales de sección transversal en pilares.
Fuente: (Higueras & Perez, 1994)

² Sección constante en toda su profundidad.

1.1.2.3 Según el estrechamiento

Además de los pilares uniformes, existen algunos cuyo ancho es el mismo en toda su profundidad y lo único que varía es su largo; como por ejemplo, el pilar de sección rectangular con perfil trapezoidal de base delgada y perfil trapezoidal de base ancha; los cuales se muestran en las Figura 1. 13 y Figura 1. 14, respectivamente. Además de los pilares de sección rectangular, también existen de sección circular.

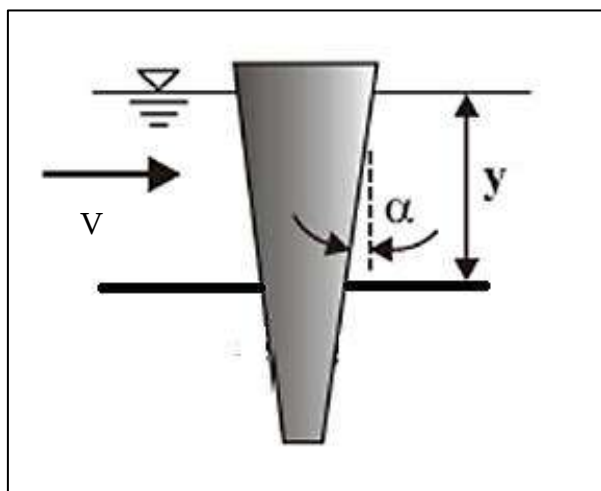


Figura 1. 13 Vista lateral de pilar con estrechamiento hacia abajo.
Elaboración: Propia

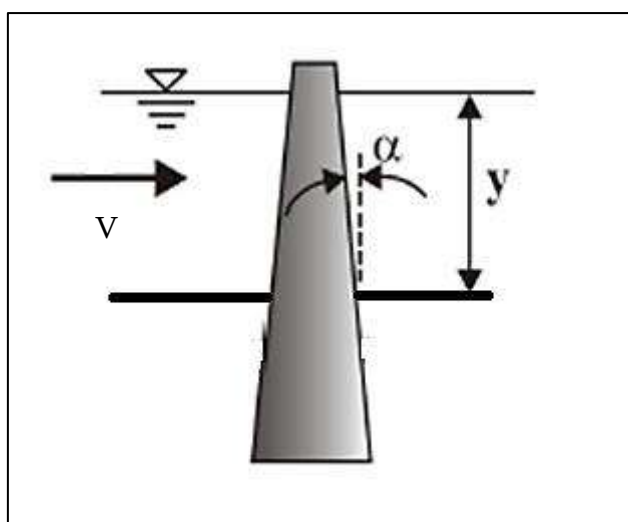


Figura 1. 14 Vista lateral de pilar con estrechamiento hacia arriba.
Elaboración: Propia

Los pilares angostos en la parte baja producen vórtices de mayor magnitud e influyen más en la socavación que los pilares angostos en la parte alta, porque estos generan menores tensiones en el cauce (Yanmaz, 2002, citado por Özalap & Bozkus, 2013, págs. 32-33). Un ejemplo de pilar con angostamiento en la parte baja es el pilar tipo placa (Figura 1. 7). También en la Ciudad de Piura existe el puente, Cáceres, con aquel tipo de pilar y se puede observar en la Figura 1. 15.



Figura 1. 15 Pilar del Puente Cáceres
Fuente: Elaboración propia.

1.2 Erosión³

1.2.1 Definición

La erosión es un fenómeno hidrodinámico que causa la remoción de las partículas del fondo del río. Se produce porque el agua al estar en contacto con el material, genera fuerzas hidráulicas que superan la resistencia ofrecida por aquel.

1.2.2 Tipos de Erosión

Los tipos de erosión se clasifican en dos diferentes grupos según la naturaleza de su alcance. Esta naturaleza puede ser espacial o temporal. La clasificación temporal basa su distinción en el desarrollo del fenómeno a lo largo del tiempo, mientras que la espacial distingue los tipos de erosión según su alcance en el espacio. La distinción espacial es esencial para un buen análisis y diseño, pero se requiere de un análisis temporal para lograr un diseño completo y satisfactorio.

1.2.2.1 Clasificación Temporal

La clasificación temporal permite tener en cuenta aspectos que en la distinción espacial podrían pasar desapercibidos, induciendo a un análisis erróneo. En el tiempo, la erosión producida en el fondo de un río puede ser permanente o momentánea. La erosión momentánea se da gracias a la sedimentación, que vuelve a rellenar el foso socavado. Por consiguiente, se pueden producir en el

³ Este apartado se ha realizado utilizando la referencia (Briceño, 2003)

lecho grandes profundidades de erosión que pueden ser ignoradas por su corta duración, originando algunas interpretaciones erróneas. Debido a ello, se recomienda que la erosión espacial se calcule a lo largo del tiempo.

A) Erosión Permanente

Es una erosión a largo plazo que se mantiene en el tiempo, es decir, no recuperable. Esta profundización del nivel del fondo del cauce ocurre en longitudes importantes de la corriente, en un proceso que obedece a fenómenos geomorfológicos, los cuales pueden ser acelerados por la intervención antrópica del cauce. En ocasiones, es ignorada en los cálculos de erosión porque no es detectada o se asume que es insignificante. Sin embargo, el conocimiento de esta puede permitir detectar grandes profundizaciones del cauce durante la vida útil de una estructura. La obra humana que más frecuentemente causa una erosión permanente a largo plazo es la construcción de una presa, que causa una erosión progresiva que avanza aguas abajo.

B) Erosión Transitoria

Es una erosión momentánea. Normalmente se da durante la fase ascendente de una avenida. Se dispone de suficientes indicios para suponer que el fondo de un río se erosiona durante la fase ascendente de la avenida (incremento de la energía con el consiguiente aumento su capacidad erosiva) y vuelve a rellenarse durante la fase descendente (proceso inverso). Esto ocasiona que tras la avenida el fondo del cauce se pueda encontrar en la misma cota que antes, como si nada hubiera pasado, originando interpretaciones erróneas. El fenómeno de la erosión transitoria aún no es bien entendido y no es claro en ríos de gran pendiente.

1.2.2.2 Clasificación Espacial

Los tipos de erosión agrupados en esta clasificación son los más conocidos e investigados dentro del campo la ingeniería civil. El conocimiento de estos tipos de erosión permite tener en cuenta aspectos que para el diseño y construcción de obras hidráulicas, tales como puentes y represas, tienen una gran trascendencia. Existen dos tipos de erosión considerando su alcance en el espacio:

A) Erosión General

Este tipo de erosión afecta a tramos largos del cauce y está relacionada con la energía que adquiere el agua al aumentar su velocidad. Al aumentar la velocidad de la corriente aumenta también su capacidad erosiva, superando la resistencia al movimiento de las partículas del suelo causando su desprendimiento. Ocurre independientemente de la presencia de estructuras impuestas por el hombre y sería el único o primordial tipo de erosión en un cauce recto y sin ninguna singularidad. La erosión general guarda relación con la erosión permanente, ya que normalmente se dan al mismo tiempo. Es un fenómeno que ocurre sobre un amplio rango de escalas de espacio y de tiempo, aun cuando eventos catastróficos puedan acelerarlo. Pueden inducir a una erosión general significativa los cambios del uso de la tierra, como la deforestación y la urbanización.

B) Erosión Local

La erosión local afecta a una pequeña extensión del cauce y se origina por la acción de un flujo más complejo que el que se presenta en la erosión general. El flujo local tiene una fuerte turbulencia y desarrolla remolinos o vórtices, que son los principales causantes del fenómeno. Se presenta en sitios particulares de la corriente, como tramos curvos o en las vecindades de los obstáculos, los cuales generan un cambio en el patrón del flujo. Las estructuras hidráulicas como presas, puentes con pilares o estribos dentro del cauce, obras de encauzamiento, entre otros producen este tipo de erosión

A continuación se abordará con mayor detalle la erosión local en pilares, por ser el tipo de erosión que concentra el interés de este trabajo de tesis.

1.3 Erosión Local en Pilares

1.3.1 Información General

La erosión local resulta de una triple interacción entre el cauce, la estructura y el agua. Se debe principalmente a la aparición de velocidades locales muchos mayores que la velocidad media de la corriente y a los vórtices generados por el flujo en la zona del pilar. Los vórtices desplazan el material constituyente del cauce, aun cuando la velocidad media de la corriente, o la fuerza tractiva⁴, no fuesen suficientemente grandes para hacerlo. La erosión tiene características particulares según se trate de cauces cohesivos o no cohesivos. En los cauces no cohesivos, puede producirse muy rápidamente la erosión, a veces en solo unas horas. En cambio, en los cauces cohesivos la erosión es más lenta, pero puede alcanzar finalmente valores tan altos como aquellos de los no cohesivos.

En el tiempo se desarrolla muy rápidamente la erosión, y avanza hasta llegar a una situación de equilibrio. La máxima profundidad de erosión es difícil de observar en la naturaleza, su valor puede ser instantáneo, pero suficiente para causar la falla de una estructura.

1.3.2 Mecanismos⁵

La presencia de pilares en la corriente del río, genera significativos cambios en el patrón del flujo, los cuales son los principales causantes del fenómeno de la erosión local. Dichos cambios se presentan a continuación:

1.3.2.1 Incremento de la velocidad

En las cercanías del pilar, el incremento de la velocidad se debe a la disminución de la sección natural del río, lo cual causa un incremento en la energía cinética de la corriente produciendo grandes aceleraciones y turbulencia. Esto se debe al principio de la conservación del caudal, que dice: si la sección que atraviesa el fluido disminuye, la velocidad del fluido debe aumentar, para que el

⁴ La fuerza que produce un flujo de agua ya sea en un canal o en una tubería. Esta fuerza tiende a arrastrar materiales que se encuentren eventualmente depositados en el fondo.

⁵ Este apartado se ha realizado utilizando la referencia (Guo, Suaznabar, Shan, & Shen, 2012).

volumen transportado sea constante. Este aumento de velocidad en la vecindad de la pila genera un aumento del poder erosivo del agua en dicha zona, superando la resistencia ofrecida por los materiales y causando su erosión.

1.3.2.2 Vórtices

El origen de los vórtices alrededor del pilar se debe a un proceso que inicia cuando el flujo choca con la cara delantera del pilar, lo cual produce una región de estancamiento. El flujo se desacelera alrededor del pilar, de manera que el gradiente de velocidad vertical del flujo se transforma en un gradiente de presión en la parte donde impacta directamente sobre la estructura.

El flujo vertical de estancamiento se divide en dos chorros, uno ascendente y otro descendente en la cara delantera del pilar, como se muestra en la Figura 1. 16. El punto de separación de ambos chorros es el punto 1 y es el lugar donde se produce la máxima energía del flujo, la cual se obtiene de la suma de las componentes hidrostáticas y cinéticas a cualquier profundidad.

El chorro ascendente se dirige hacia el nivel de la superficie del agua en el punto 2, creando una onda que aumenta la elevación de la superficie hacia el punto 3. Del modo contrario, el chorro descendente se dirige en dirección al cauce.

En aguas poco profundas, la componente hidrostática de la energía total es pequeña comparada con la componente cinética, resultando un punto de estancamiento cerca de la superficie del agua y un importante chorro descendente. La erosión bajo esta condición, se llama "erosión de aguas poco profundas". En aguas profundas la componente hidrostática es mayor y cuando se combina con la componente cinética crean un campo de presión mucha más uniforme sobre la cara del pilar, con el punto de separación más cerca del suelo y un chorro más suave hacia arriba y hacia abajo. La erosión bajo esta condición es más débil y se llama "erosión de agua profunda".

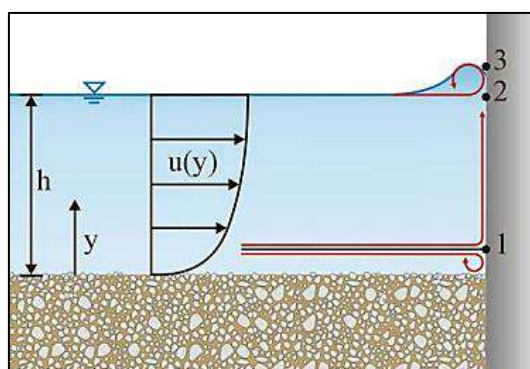


Figura 1. 16 Vista lateral de las interacciones flujo-estructura en la fase de inicial.

Fuente: (Guo, Suaznabar, Shan, & Shen, 2012)

El proceso continúa cuando el chorro descendente cava un agujero delante del pilar, el cual induce a que el chorro cambie su dirección hacia arriba, adquiriendo un movimiento giratorio y formándose un sistema complejo de vórtice. Este vórtice se extiende río abajo y pasa por los lados del pilar hasta formar parte de

la turbulencia general donde pierde su identidad. Debido a su semejanza a una herradura, este vórtice es llamado vórtice de herradura. Es el principal causante de la remoción del sedimento del cauce en torno al pilar y está muy asociado a la forma de su sección transversal. A medida que el foso de erosión crece, también lo hace el vórtice, pero a una tasa decreciente. A su vez, el perfil de velocidad inicial se redistribuye desplazando el punto 1 hacia arriba. Como resultado, el chorro descendente se hace más fuerte al igual que el vórtice de herradura, causando la aceleración del proceso de erosión. Una vez que el punto 1 se mueve lo suficientemente cerca de la superficie del agua, el chorro descendente y los vórtices de herradura alcanzan un equilibrio⁶ (Figura 1. 17). La determinación del punto de separación requiere perfiles de velocidad precisos y ecuaciones que están fuera del alcance de este análisis.

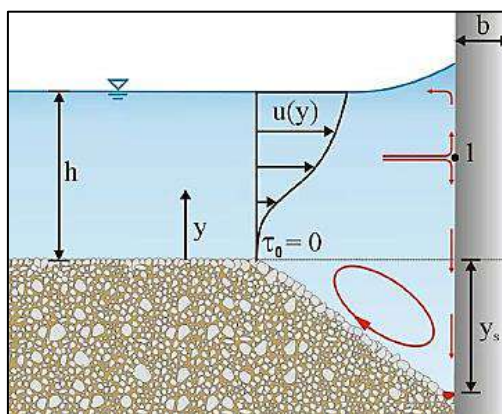


Figura 1. 17 Vista lateral del vórtice de herradura desarrollándose hasta que se alcanza un equilibrio.

Fuente: (Guo, Suaznabar, Shan, & Shen, 2012)

Otro tipo de vórtice generado por la presencia del pilar son los llamados vórtices de estela, que resultan de la separación del flujo al bordear el obstáculo, como se muestra en la Figura 1. 18. Los vórtices de estela son muy inestables, actúan como pequeños tornados que levantan el sedimento del fondo.

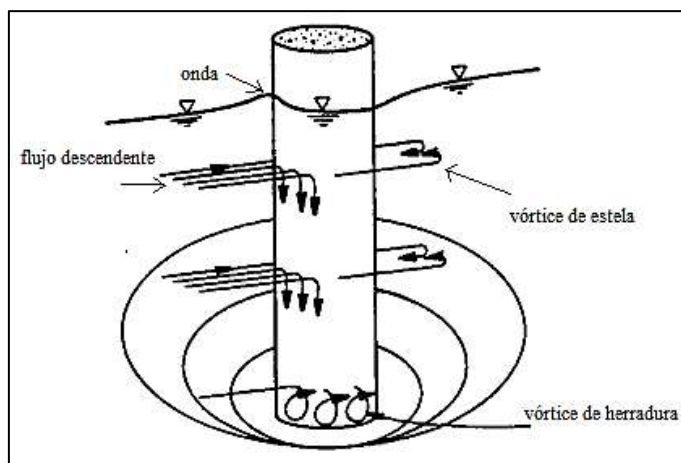


Figura 1. 18 Representación esquemática de erosión en pilar cilíndrico

Fuente: (Melville, 2008)

⁶ La condición de equilibrio corresponde a la situación en la cual el poder erosivo del agua es incapaz de seguir erosionando el material del fondo.

1.3.3 Cálculo de la profundidad

La erosión local está en función de las características del material del cauce, propiedades del flujo y la geometría del pilar. El material del cauce se caracteriza por ser granular o cohesivo. Dentro de las propiedades de interés del flujo aguas arriba del pilar se encuentran: el tirante (y), la velocidad media (V) y el ángulo con el que el vector velocidad ataca al pilar (α). Por último, la geometría del pilar se caracteriza por las dimensiones y forma de su sección transversal.

Existen varios métodos para el cálculo de la erosión local, pero a la fecha ninguna solución es rigurosa ni exacta. El estudio de la erosión local se ha hecho fundamentalmente en ensayos de laboratorio para pilares uniformes. Briceño, M. C. (2003, pág. 28) realizó un análisis sobre los parámetros usados por algunos métodos conocidos, estos se observan en la Tabla 1. 1. Claramente los parámetros más utilizados son los geométricos, luego le siguen los hidráulicos y a continuación los geotécnicos.

Tabla 1. 1 Parámetros usados por métodos para erosión local en pilares.

Parámetro Métodos	Hidráulicos				Geométricos			Geotécnicos		
	V	y	γ	v	a	Forma	α	D	γ_s	ϕ
Laursen y Toch					X	X	X			
Maza y Sánchez	X	X			X	X	X			
Larras					X	X	X			
Carstens	X		X		X			X	X	X
Yaroslavtziev	X	X			X	X	X	X		
Nueva Zelanda	X	X			X	X	X	X		
HEC-18	X	X			X	X	X	X		

Fuente: (Briceño, 2003)

La ecuación 1.1, publicada en HEC-18 (2012), es la más recomendada, ya que se puede aplicar tanto para lechos móviles como agua clara. Esta ecuación fue desarrollada con base en análisis dimensional de los parámetros que afectan la erosión y análisis de datos numéricos. Es el método más usado en los Estados Unidos de América y también en el programa HEC-RAS.

$$\frac{d_{se}}{y} = 2k_1k_2k_3k_4\left(\frac{a}{y}\right)^{0.65}F_r^{0.43} \quad (1.1)$$

Dónde:

d_{se} : Profundidad de erosión local (m).

y : Profundidad del flujo aguas arriba del pilar (m).

k_1 : Factor que toma en cuenta la forma del pilar.

k_2 : Factor que toma en cuenta el ángulo de ataque del flujo.

k_3 : Factor que toma en cuenta la forma del cauce.

k_4 : Factor que toma el acorazamiento del sedimento del cauce.

a : ancho del pilar (m).

l : longitud del pilar (m)

F_r : Número de Froude en la sección aguas arriba del pilar.
 V : Velocidad media del flujo directamente aguas arriba del pilar.

El factor de corrección k_1 depende la forma del pilar (Tabla 1. 2), para ángulos de ataque menores a 5° . Para ángulos mayores, k_2 domina sobre k_1 , y debe ser considerado como 1.0.

Tabla 1. 2 Factor de corrección k_1 para la forma del pilar.

Forma de la Pila	k_1
Nariz Cuadrada	1,1
Nariz Redonda	1,0
Cilíndrica	1,0
Punta Aguda	0,9
Grupo de Cilindros	1,0

Fuente: (HEC-18, 2012)

El factor de corrección k_2 depende del ángulo de ataque le flujo (Tabla 1. 3) y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$k_2 = (\cos \alpha + \frac{l}{a} \sin \alpha)^{0,65} \quad (1.2)$$

Tabla 1. 3 Factor de corrección k_2 por el ángulo de ataque del flujo

Ángulo de ataque (grados)	$l/a = 4$	$l/a = 8$	$l/a = 12$
0	1,0	1,0	1,0
15	1,5	2,00	2,5
30	2,0	2,75	3,5
45	2,3	3,30	4,3
90	2,5	3,90	5,0

Fuente: (HEC-18, 2012)

Si $l/a > 12$, se usan los valores correspondientes a l/a como máximos.

El coeficiente k_3 depende de la forma del cauce (Tabla 1. 5). Se recomienda usar un valor igual 1.1 considerando que el cauce tiende a ser plano durante creciente.

Tabla 1. 4 Factor de corrección k_3 por la forma del cauce

Condición del cauce	Altura de la duna H (pies)	k_3
Agua clara	N/A	1,1

Tabla 1. 5 Factor de corrección k_3 por la forma del cauce (continuación)

Condición del cauce	Altura de la duna H (pies)	k_3
Fondo plano y antidunas	N/A	1,1
Dunas pequeñas	$2 < H < 10$	1,1
Dunas medianas	$10 < H < 30$	1,1 a 1,2
Dunas grandes	$H \geq 30$	1,3

Fuente: (HEC-18, 2012)

El coeficiente k_4 tiene por objeto disminuir el valor calculado de erosión por acorazamiento del hoyo socavado para materiales del cauce con D_{50} mayor o igual a 2 mm o D_{95} mayor o igual a 20 mm ($D_{50} \geq 0,002$ m o $D_{95} \geq 0,02$ m). Se obtiene de la siguiente expresión:

$$k_4 = [1 - 0,89(1 - \frac{V_o - V_i}{V_{c90} - V_i})^2]^{0,5} \quad (1.3)$$

$$V_i = 0,645(\frac{D_{50}}{b})^{0,053} V_{c50} \quad (1.4)$$

$$V_{c50} = 6,19y_n^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (1.5)$$

Dónde:

V_o : Velocidad de acercamiento aguas arriba del pilar (m/s).

V_i : Velocidad a la cual se inicia la erosión en la pila, en granos de tamaño D_{50} (m/s).

V_{c90} : Velocidad crítica para movimiento incipiente del material de tamaño D_{90} (m/s).

V_{c50} : Velocidad crítica para movimiento incipiente del material de tamaño D_{50} (m/s).

D_{50} : Diámetro característico que indica que el 50% del peso del material del cauce en estudio lo constituyen partículas de diámetro menor a él (m).

Anteriormente se ha mencionado que el parámetro que más se repite en las fórmulas de erosión local es la geometría de pilares uniformes, pero además se sabe que existen otros tipos de pilares cuya geometría cambia en profundidad, los cuales no son considerados en la formulación. Por ello, existen investigadores como lo son Breusers, H y Raudkivi, A (1991), quienes experimentaron con pilares cónicos y dedujeron que la interacción entre el flujo y el pilar con angostamiento en la parte baja generan vórtices de herradura que no pueden ser arrastrados hacia aguas abajo con facilidad. Como consecuencia de aquello, se produce una profundidad de erosión (d_{se}) más grande que en pilares angostos en la parte alta y pilares uniformes. Además, Yanmaz, A. M. (2002) percibió que los pilares angostos en la parte alta, causan menores esfuerzos en el cauce. En la Figura 1. 19 y Figura 1. 20 se muestran la erosión local para pilares con estrechamiento.

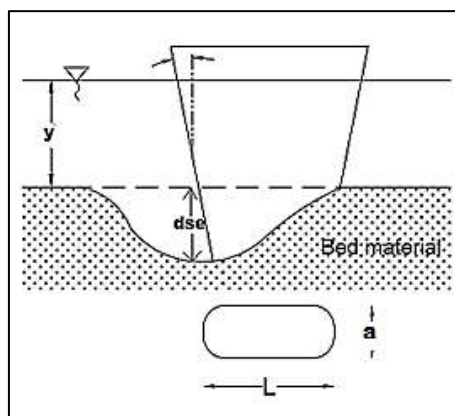


Figura 1. 19 Vista lateral de la erosión local en pilar con estrechamiento hacia abajo.

Fuente: (Özalap & Bozkus, 2013)

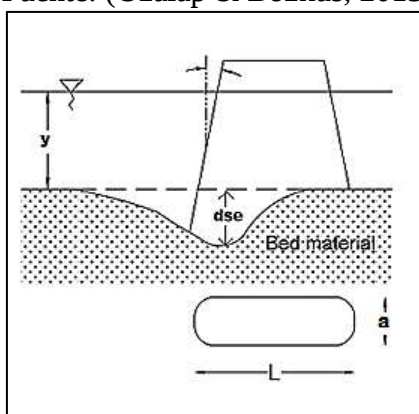


Figura 1. 20 Vista lateral de la erosión local en pilar con estrechamiento hacia abajo.

Fuente: (Özalap & Bozkus, 2013)

Además, dedujeron coeficientes de forma (k_1), los cuales se muestran en la Tabla 1. 6. Se observa que los pilares angostos en la parte baja generaron mayor profundidad de erosión (d_{se}) que los demás y por ello tienen un mayor coeficiente de forma. Recordemos, el coeficiente de forma disminuye mientras la forma del pilar sea más aerodinámica y produzca menos erosión.

Tabla 1. 6 Factores de forma para pilares sección circular y forma variable en altura.

Forma	V (m/s)	d_{se}/a	k_1
Cilindro (Uniforme)	0,67	1,69	1,0
	0,81	1,71	1,0
Estrechamiento hacia abajo	0,67	2,03	1,20
	0,81	2,06	1,20
Estrechamiento hacia arriba	0,67	1,31	0,78
	0,81	1,26	0,74

Fuente: (Breusers & Raudkivi, 1991)

Capítulo 2

Dinámica computacional de fluidos

2.1 Definición

La Dinámica computacional de fluidos o CFD⁷, es una metodología adoptada para resolver problemas de flujo de fluidos en la práctica de la ingeniería moderna. Su función es solucionar las ecuaciones matemáticas que representan las características físicas del movimiento de cualquier fluido; puede representarlo y analizarlo de forma aproximada con el fin de obtener su mayor entendimiento.

El aspecto computacional complementa a los métodos experimentales y analíticos para dar mayor precisión al estudio de los fluidos, en particular, cuando éstos son muy complejos.

2.1.1 Ventajas

Las ventajas más importantes que se consideran de CFD son:

- El desarrollo teórico de las ciencias computacionales se centra en la construcción, solución y estudio de diversas aproximaciones a las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos.
- Complementa los enfoques experimentales y analíticos al proporcionar un medio alternativo rentable de la simulación de flujos de fluidos reales.
- Reduce los tiempos, costos y la producción en el diseño en comparación con los enfoques basados experimentalmente.
- Ofrece la capacidad de resolver una serie de problemas de flujo donde falta el enfoque analítico.
- Tiene la capacidad de simular las condiciones de flujo que no pueden reproducirse en las pruebas experimentales.
- Puede proporcionar una visualización detallada y amplia información en comparación con la dinámica de fluidos analítica y experimental.

⁷ CFD: *Computational fluid Dynamics*

2.1.2 Desventajas

Existen algunas limitaciones inherentes de la aplicación de CFD, entre las cuales se encuentran:

- Existen errores numéricos en los cálculos, por lo tanto, habrá diferencias entre los resultados calculados y la realidad. La visualización de las soluciones numéricas usando vectores, contornos, o películas animadas de los flujos inestables es la forma más eficaz de interpretar la gran cantidad de datos generados a partir del cálculo numérico. Sin embargo, existe el peligro de que una solución errónea, que puede verse bien, no se corresponda con el comportamiento del flujo esperado. Los autores han encontrado numerosas características de flujo producidas numéricamente incorrectas que podrían haber sido interpretados como fenómenos físicos aceptables.
- Brillantes imágenes en color pueden implicar una representación realista de la mecánica de fluidos reales dentro del sistema de flujo, pero son inútiles si no son cuantitativamente correcta. Por lo tanto, un usuario CFD necesita aprender cómo analizar correctamente y hacer juicios críticos acerca de los resultados calculados.

2.2 Ecuaciones matemáticas de transporte⁸

Cuando estudiamos el comportamiento dinámico de los fluidos, usualmente estamos interesados en algún aspecto de lo que se denomina "fenómenos de transporte" del fluido, es decir, la capacidad que tienen los fluidos en movimiento de transportar materia y propiedades de un lugar a otro y el mecanismo por el cual la materia y sus propiedades se difunden y transmiten a través del medio fluido. Es conveniente categorizar los métodos de análisis disponibles en término de los diferentes tipos de proceso de transporte. En otras palabras, el método de análisis debe elegirse de tal manera que se apliquen las leyes físicas que correspondan al problema de estudio.

Los fenómenos de transporte fundamentales que están asociados con el movimiento de un fluido son el transporte de masa, calor y momentum. Cada uno de estos procesos está asociado con una ley física básica que ha sido formulada como un resultado de la observación y la experiencia.

Tabla 2.1 Leyes Físicas de transporte

Proceso	Ley observada
Transporte de masa	Conservación de la materia.
Transporte de calor	Conservación de la energía (primera de ley de la termodinámica).
Transporte de momentum	Segunda ley de Newton (ecuación del movimiento).

Elaboración: Propia.

CFD se basa fundamentalmente en las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos. Aquellas ecuaciones representan los enunciados matemáticos de las leyes de conservación de la física, las cuales son:

⁸ Este apartado se ha realizado utilizando la referencia (Malalasekera & Versteeg, 1995).

2.2.1 Transporte de Masa

El movimiento de todos los fluidos debe satisfacer el principio de conservación de la materia. Si vamos a analizar el movimiento de un fluido, tendremos que preocuparnos por el transporte de masa.

Considerar un volumen de control V fijo en el espacio y tiempo. El fluido se mueve a través del volumen de control fijo y a la vez por la superficie de control. La conservación de la masa requiere que la tasa de cambio de la masa que entra al volumen de control sea equivalente a flujo de la masa que atraviesa la superficie S de volumen V .

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_S \rho U \cdot n dS \quad (2.1)$$

Dónde:

U : Velocidad

n : Vector normal unitario.

ρ : Densidad

Transformando la segunda integral con el teorema de la divergencia de Gauss e introduciendo la derivada dentro de la primera integral

$$\int_V \left[\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho U) \right] dV = 0 \quad (2.2)$$

Ya que la ecuación 2.2 es válida para cualquier volumen V , la implicación es que

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.3)$$

En el sistema de coordenadas cartesianas la ecuación 2.3 puede ser expresada como

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad (2.4)$$

Ésta es la llamada ecuación de la conservación de la masa o ecuación de la continuidad en un punto para un fluido compresible. Para un fluido incompresible y de densidad constante la ecuación 2.4 se simplifica en:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2.5)$$

2.2.2 Transporte de Momentum

Los fenómenos de transporte de momentum son de primordial interés en mecánica de fluidos ya que ellos engloban los mecanismos de resistencia, esfuerzos de corte internos y de frontera, propulsión y fuerzas en cuerpos sumergidos.

Es la segunda Ley de Newton la que provee la relación fundamental entre la resultante de las fuerzas que actúan sobre una partícula y la variación temporal del cambio de momentum (producto de la masa de una partícula y su vector velocidad).

La segunda ley de Newton establece que la suma de fuerzas en el elemento es igual al producto de su masa y su aceleración. Ya que esta afirmación es una relación vectorial, se puede descomponer en tres relaciones escalares mediante los ejes (x, y, z). Considerando solo la componente x:

$$\sum F_x = ma_x \quad (2.6)$$

En primer lugar, considérese la parte izquierda de la ecuación 2.6. Partiendo de la afirmación de que el elemento experimenta una fuerza en la dirección x, las fuentes de esta fuerza pueden dividirse en dos tipos:

- Fuerzas de superficie: fuerzas viscosas, de presión, que actúan directamente en la superficie del elemento del fluido.
- Fuerzas del cuerpo: fuerza centrífuga, la gravedad, Coriolis, fuerzas electromagnéticas, que actúan directamente en la masa del volumen del elemento en cuestión.

El estado en que el elemento del fluido se encuentra sometido debido al esfuerzo en su superficie, está definido en términos de presión y las nueve componentes de esfuerzo viscoso.

La presión, un esfuerzo normal, se denomina p . Los esfuerzos viscosos vienen denominados por τ , agrupados en la matriz del tensor σ representado en la ecuación 2.7. La anotación habitual de los dos sufijos τ_{ij} se aplica para indicar la dirección de tales esfuerzos. El sufijo j señala el esfuerzo viscoso actuando en esa dirección, en una superficie normal a la dirección i .

$$\sigma = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Los esfuerzos cortante y normal en un fluido están relacionados con la deformación del elemento del fluido a través del tiempo, como se puede ver en Figura 2.1. Aquí, el esfuerzo cortante (a) está relacionado con la deformación cortante en el tiempo, mientras que el esfuerzo normal (b) está relacionado con el cambio de volumen del elemento en el tiempo.

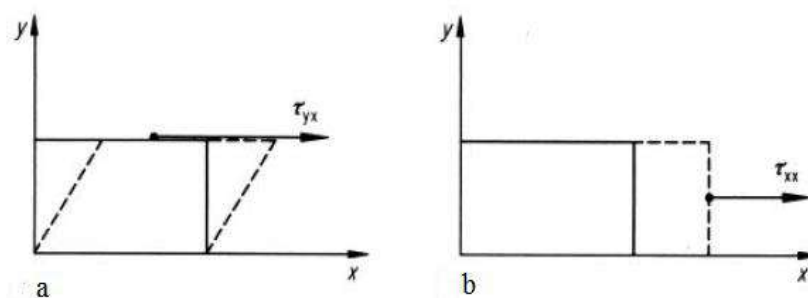


Figura 2.1 Esfuerzo cortante (a) y normal (b)

Fuente: Elaboración propia

Como resultado, estos dos esfuerzos, así como la presión, dependen de los gradientes de velocidad en el fluido. En la mayoría de los fluidos viscosos, los esfuerzos normales son mucho más pequeños que los esfuerzos cortantes, por lo que en muchas ocasiones son despreciados. Los esfuerzos normales (como τ_{xx}), ganan más protagonismo cuando los gradientes de velocidad en la dirección normal (como $\partial u/\partial x$) son muy grandes, como por ejemplo dentro de una ola.

En el eje x de un sistema de coordenadas tridimensional se encuentran las fuerzas debidas a la presión p , y las componentes de esfuerzo τ_{xx} , τ_{yx} y τ_{zx} , mostrándose en la Figura 2.2. Se observa que las fuerzas alineadas con la dirección normal de un eje reciben un signo positivo y aquellas en la dirección opuesta reciben un signo negativo. La fuerza resultante en la dirección x es la suma de las fuerzas en los componentes actuando en el elemento.

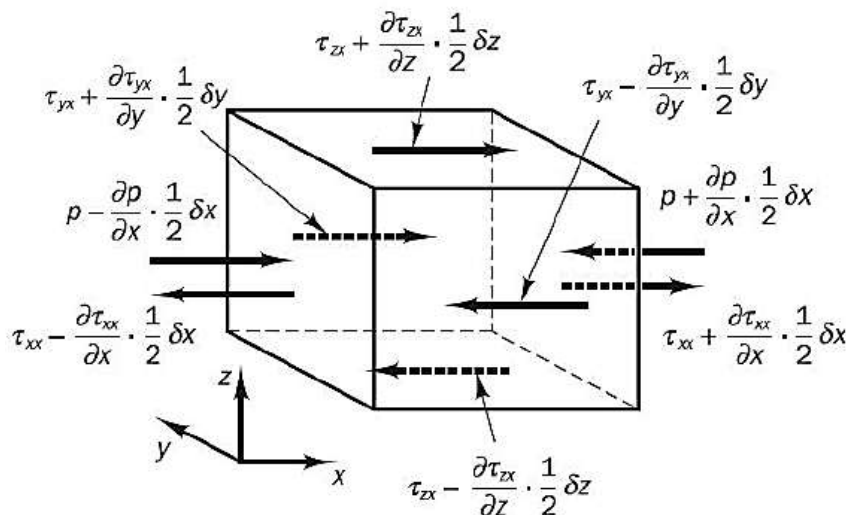


Figura 2.2 Componentes de fuerza en la dirección x .

Fuente: (Malalasekera & Versteeg, 1995)

Aquí la presión es la magnitud de fuerza resultante del producto entre fuerza y superficie. Después de hacer un balance de fuerzas entre caras opuestas, se obtiene la fuerza resultante:

$$\left(\frac{d(-p + \tau_{xx})}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz}\right)dx dy dz \quad (2.8)$$

Ya determinadas las fuerzas de superficie, luego denótese f_x la fuerza del cuerpo por unidad de masa actuando sobre el elemento en la dirección x . Un ejemplo podría ser la gravedad, en la dirección z . Asumiendo que el volumen de un elemento es (dx, dy, dz) , se obtiene la fuerza:

$$\rho f_x(dx dy dz) \quad (2.9)$$

Si se juntan estos dos últimos términos, se obtiene que la fuerza resultante en la dirección x es, por unidad de volumen:

$$F_x = \left(\frac{d(-p + \tau_{xx})}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz}\right)dx dy dz + \rho f_x dx dy dz \quad (2.10)$$

Ahora, volviendo al lado derecho de la ley de Newton, la masa del elemento en cuestión está fijada y es igual a:

$$m = \rho dx dy dz \quad (2.11)$$

Y por último, nótese que la aceleración de la partícula no es más que el cambio en el tiempo de su velocidad. Ya que se está siguiendo el movimiento del elemento del fluido, este cambio en el tiempo de la velocidad está dado por la derivada total. Recordando que se está trabajando en la dirección x :

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (2.12)$$

Finalmente, combinando estas ecuaciones, la conservación de la cantidad de movimiento viene dada por:

Componente x :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{d(-p + \tau_{xx})}{dx} + \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \frac{d\tau_{zx}}{dz} + \rho f_x \quad (2.13)$$

Componente y :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{d(-p + \tau_{yy})}{dy} + \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\tau_{zy}}{dz} + \rho f_y \quad (2.14)$$

Componente z:

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{d(-p + \tau_{zz})}{dz} + \frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} + \rho f_z \quad (2.15)$$

La presión recibe signo negativo ya que está establecido que los esfuerzos de tensión mantengan el signo positivo, y la presión es una esfuerzo a compresión.

Todo lo desarrollado, se resume en:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho \frac{dU}{dt} + \rho(U \cdot \nabla)U = -\nabla p + \nabla \sigma + \rho \vec{f} \quad (2.16)$$

La ecuación 2.16 es general y puede aplicarse a cualquier tipo de fluido. Sin embargo dicha ecuación aún no es capaz de determinar las ecuaciones del movimiento. El problema se resuelve si somos capaces de ligar los esfuerzos con las deformaciones que experimenta el volumen de fluido. Para poder hacer esta ligación es necesario definir el comportamiento reológico del fluido.

2.2.3 Transporte de Calor

Esta ecuación esta fuera del entorno de estudio de este trabajo, puesto que no afecta al problema que se presenta. Normalmente la energía de un fluido se define como la suma de la energía interna (que depende de la temperatura y fase del fluido), la energía cinética (que depende de la velocidad), y la energía potencial (que depende de la posición).

2.3 Ecuaciones de Navier Stokes para fluidos Newtonianos⁹

En un fluido Newtoniano los esfuerzos viscosos son proporcionales a la deformación. La ley de Newton de la viscosidad para fluidos no compresibles en tres dimensiones incluye solo una constante de proporción: la viscosidad dinámica μ , que relaciona esfuerzos con deformaciones lineales. Las nueve componentes de fuerzas viscosas, son:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{dU_i}{dx} \quad (2.17a)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{dU_j}{dy} \quad (2.17b)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{dU_k}{dz} \quad (2.17c)$$

⁹ Este apartado se ha realizado utilizando la referencia (Malalasekera & Versteeg, 1995).

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{dU_i}{dy} + \frac{dU_j}{dx} \right) \quad (2.17d)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{dU_i}{dz} + \frac{dU_k}{dx} \right) \quad (2.17e)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{dU_j}{dz} + \frac{dU_k}{dy} \right) \quad (2.17f)$$

La sustitución de estos esfuerzos cortantes en la ecuación 2.16 de la conservación de la cantidad de movimiento da paso a las denominadas ecuaciones de Navier Stokes:

En la componente X, por ejemplo, desarrollando la expresión quedaría:

$$\frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} = \mu \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right) \quad (2.18)$$

Finalmente, y asumiendo la fuerza $\vec{f}$ como la gravedad, las ecuaciones de Navier-Stokes pueden representarse en la forma más famosa para el desarrollo por el método de volúmenes finitos:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{dp}{dx} + \mu \cdot \Delta \cdot u + \rho g \quad (2.19a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{dp}{dy} + \mu \cdot \Delta \cdot v + \rho g \quad (2.19b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{dp}{dz} + \mu \cdot \Delta \cdot w + \rho g \quad (2.19c)$$

En general:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \mu \cdot \Delta \cdot U + \rho g \quad (2.20)$$

2.4 Ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)¹⁰

La ecuación 2.20 se puede aplicar tanto a flujos laminares como turbulentos. Hay que tener presente, sin embargo, que por su naturaleza el movimiento turbulento es impermanente, por lo que la aplicación directa de la ecuación 2.20 a tales flujos no es

¹⁰ Este apartado se ha realizado utilizando la referencia (Malalasekera & Versteeg, 1995)

posible. En la práctica se trabaja con cantidades medias temporales, utilizando las ecuaciones de Reynolds. Estas ecuaciones se obtienen de descomponer U y p de la ecuación 2.20 en dos componentes: una componente media temporal y una fluctuante que es función del tiempo:

$$U(t) = \bar{U} + U'(t) \quad (2.21)$$

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.22)$$

Mientras que las ecuaciones hasta ahora expuestas son suficientes para describir un fluido incompresible y laminar y, siendo una descripción para la continuidad en principio aplicable a toda escala, también son no-lineales y están sujetas a la inestabilidad. De manera natural, esta inestabilidad forma el fenómeno de la turbulencia. Prácticamente esto hace imposible resolver las ecuaciones analíticamente y requiere nuevas formulaciones de métodos numéricos para la solución de un estado particular del flujo. Normalmente estas formulaciones se realizan en un flujo estacionario, es decir, cuando el flujo ya está completamente desarrollado.

La turbulencia es un régimen en que las propiedades de un fluido en un estado estacionario se manifiestan de manera aleatoria y caótica. Incluso en fluidos donde las principales presiones y velocidades tienen lugar en un espacio 2-D, las fluctuaciones turbulentas siempre tienen un carácter tridimensional. Además, si se mira un flujo desarrollado en régimen turbulento, se podrá apreciar formaciones de estructuras rotatorias, arremolinadas, los denominados famosos *eddies*, con una amplia gama de tamaños (Malalasekera & Versteeg, 1995, pág. 41).

Una típica medida de la velocidad en un punto es muy probable que presente una forma como la mostrada en la figura siguiente:

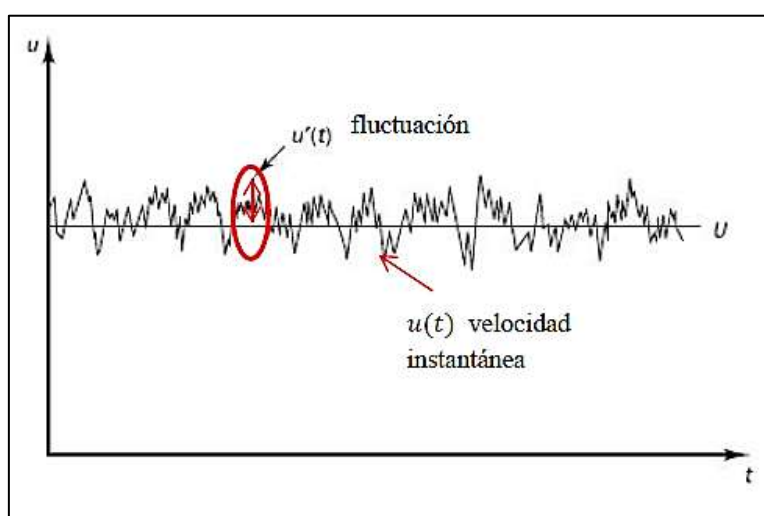


Figura 2.3 Descomposición de Reynolds de la velocidad en un punto.

Fuente: (Malalasekera & Versteeg, 1995)

Un fluido en régimen turbulento puede describirse con valores de las diferentes propiedades del fluido ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$), y algunas propiedades estadísticas de sus fluctuaciones (u', v', w', p').

Dicho de otra manera, las velocidades instantáneas por las que se rigen las ecuaciones de Navier-Stokes no sirven en la predicción ya que varían mucho en el tiempo.

Las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) utilizan las velocidades medias para un periodo de tiempo determinado en vez de valores instantáneos para poder describir el flujo.

Una vez descompuesto, se aplica el promedio en el tiempo (*time-averaged*), en este caso la variable velocidad. Para un periodo de tiempo determinado T, la velocidad media puede expresarse:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_T u dt \quad (2.23)$$

Ahora, la velocidad media de la fluctuación u' está en torno a 0:

$$u' = u - \bar{u}, \quad \bar{u'} = \frac{1}{T} \int_T (u - \bar{u}) dt = \frac{1}{T} \int_T u dt - \frac{1}{T} \bar{u} T = 0 \quad (2.24)$$

Aplicándose a Navier-Stokes:

$$\frac{du}{dx} = \frac{d\bar{u}}{dx} + \frac{du'}{dx} \quad (2.25)$$

Y siguiendo lo anterior, para calcular la media de estas variaciones

$$\frac{1}{T} \int_T \frac{du}{dx} = \frac{1}{T} \int_T \left(\frac{d\bar{u}}{dx} - \frac{du'}{dx} \right) dt = \frac{d\bar{u}}{dx} \quad (2.26)$$

De modo generalizado, la ecuación de la conservación de la masa con términos promedios se resume en:

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0 \quad (2.27)$$

Y también se aplica en las ecuaciones de la conservación de la cantidad de movimiento.

Todo esto se resume en la Tabla 2. 2.

Tabla 2. 2 Formulación de los RANSEs

Navier-Stokes		RANS
$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$	$\xrightarrow{\frac{1}{T} \int_T dt}$	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$
$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \mu \cdot \Delta \cdot U + \rho g$		$\rho \frac{D\bar{U}}{Dt} = -\nabla \bar{p} + \mu \cdot \Delta \cdot \bar{U} + \rho g + \nabla \cdot \sigma_T$

Elaboración: Propia

Dentro del último término $\nabla \cdot \sigma_T$ se encuentran los llamados esfuerzos aparentes o de Reynolds, estos son esfuerzos extras que surgen del flujo turbulento. Para la componente x , este término vendrá compuesto por:

$$\left[\frac{d(-\rho \overline{u'^2})}{dx} + \frac{d(-\rho \overline{u'v'})}{dy} + \frac{d(-\rho \overline{u'w'})}{dz} \right] \quad (2.28)$$

Estos esfuerzos extras se asumen como 6 esfuerzos adicionales, diferenciados como:

- 3 de tipo normal:

$$\tau_{xx} = -\rho \overline{u'^2}; \tau_{yy} = -\rho \overline{v'^2}; \tau_{zz} = -\rho \overline{w'^2} \quad (2.29)$$

- 3 de tipo cortante:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \overline{u'v'}; \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho \overline{u'w'}; \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho \overline{v'w'} \quad (2.30)$$

2.5 Malla numérica¹¹

Son la representación de la geometría sobre la cual el problema es resuelto. En cada elemento del problema se resuelven las ecuaciones del problema. Existen varios métodos para discretizar el dominio. A nivel general se dividen en:

2.5.1 Mallas estructuradas

Las mallas estructuradas son aquellas formadas por un conjunto de nodos (o volúmenes de control) que pueden ser identificados de forma única mediante un grupo de índices ordenados (i, j, k) en 3D ó (i, j) en 2D. Es el tipo de malla más simple y es equivalente a una malla cartesiana mediante el cambio de coordenadas apropiado. Cada nodo P de la malla tiene 4 vecinos en 2D y 6 en 3D a los cuales se accede variando los índices (i, j, k) de P en ± 1 . Su mayor desventaja es que sólo pueden ser utilizadas en dominios con geometrías simples y muchas veces acumulan puntos en regiones que no son de interés. Suelen ser las mallas más utilizadas en los métodos de elementos finitos.

¹¹ Este apartado ha sido realizado utilizando la referencia (Ferziger & Peric, 2002).

Gran cantidad de algoritmos están diseñados para mallas cartesianas regulares y son aplicados a otras mallas mediante una transformación de coordenadas. Las mallas estructuradas se subdividen a su vez en tres grupos según cómo sea la deformación que hay que aplicar a una malla cartesiana para obtenerlas: mallas tipo O, tipo C ó tipo H. En una malla tipo O tenemos puntos organizados circularmente de tal forma que las líneas que los unen son cerradas, y por lo tanto, parecen una O. En las mallas tipo C las líneas se doblan reproduciendo la forma de C. Al resto de mallas se las denomina tipo H.

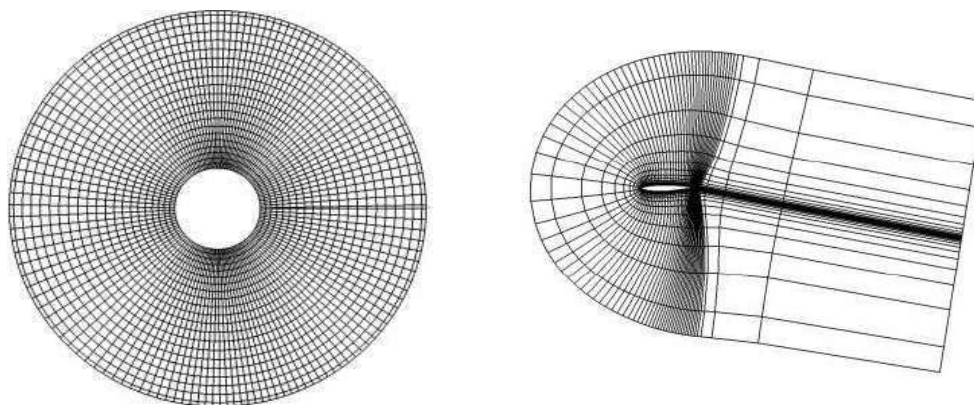


Figura 2. 4 Ejemplo de malla tipo O (lado izquierdo) y tipo C (lado derecho)

Fuente: (Ferziger & Peric, 2002)

2.5.2 Mallas estructuradas multibloque

En las mallas estructuradas multi-bloque hay uno o más niveles de subdivisión. En el nivel exterior, hay bloques generalmente grandes que pueden ser de estructura irregular e incluso solaparse. En el nivel más fino se definen mallas estructuradas con un tratamiento especial de las regiones de acoplamiento entre bloques. Este tipo de mallas es más flexible que las estructuradas y permite usar mayor resolución en aquellas regiones donde es necesario, aunque son más complejas de programar.

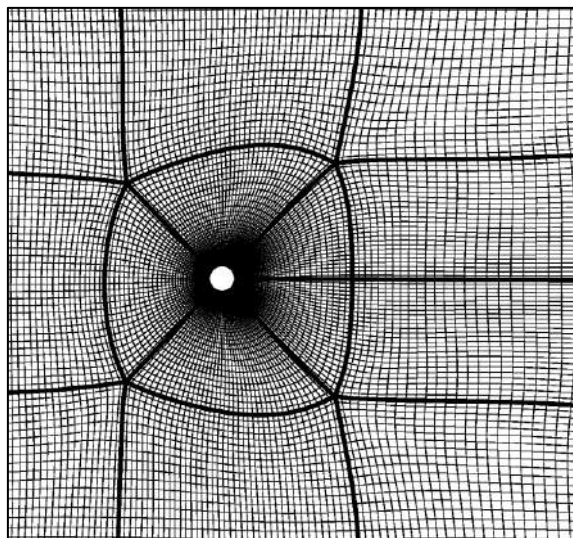


Figura 2. 5 Ejemplo de malla estructurada multi-bloque

Fuente: (Ferziger & Peric, 2002)

2.5.3 Mallas no-estructuradas

Para geometrías muy complejas, las mallas más flexibles son aquellas que se pueden adaptar de forma arbitraria al dominio. En principio, este tipo de mallas pueden ser usadas con cualquier esquema de discretización espacial, sin embargo, los métodos de volúmenes y elementos finitos son los que mejor se adaptan. Los elementos o volúmenes de control pueden tener cualquier forma, sin restricciones en cuanto al número de elementos vecinos ni nodos. En la práctica, las mallas se construyen utilizando triángulos o cuadriláteros en 2D y tetraedros o hexaedros en 3D. Existe una gran variedad de trabajos dedicados al estudio de la generación de mallas no-estructuradas de forma automática. La ventaja de su flexibilidad contrasta con la estructura irregular de los datos que produce y la necesidad de usar algoritmos más complicados y caros ya que las matrices que hay que resolver son llenas.

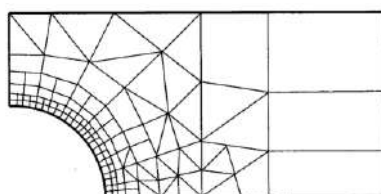


Figura 2. 6 Ejemplo de malla no-estructurada
Fuente: (Ferziger & Peric, 2002)

2.5.4 Mallas híbridas

En algunos casos se combinan los diferentes tipos de malla expuestos anteriormente. En estos casos hay que tener cuidado con el acoplamiento en las diferentes mallas.

2.6 Turbulencia¹²

La turbulencia es un fenómeno que se da en forma caótica en el cual las partículas se mueven desordenadamente. Prácticamente todos los flujos de interés en la ingeniería son turbulentos; los cuales surgen debido a números de Reynolds muy grandes. Se sabe que el número de Reynolds es una representación de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los efectos viscosos. Por lo tanto, un flujo en el cual predominan los esfuerzos inerciales sobre los esfuerzos viscosos es considerado turbulento.

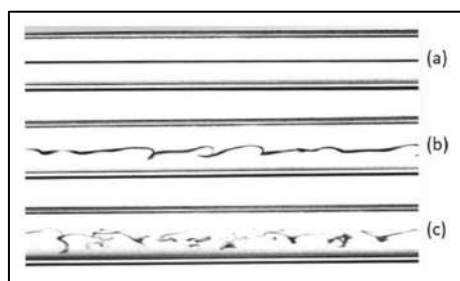


Figura 2. 7 Visualización de los regímenes de flujo según O. Reynolds. (a) flujo laminar, (b) flujo de transición, (c) flujo turbulento.

Fuente: (Kessler, 2016)

¹² Este apartado se ha realizado utilizando la referencia (Ferziger & Peric, 2002).

2.6.1 Características

La turbulencia tiene las siguientes características:

- Naturaleza fluctuante: Tanto la presión como la velocidad oscilan alrededor de un valor medio. Dichas oscilaciones son de naturaleza tridimensional.
- Aparición de remolinos: Las capas de fluido están acomodadas en estructuras coherentes llamadas remolinos o vórtices. Los vórtices tienen una amplia distribución de tamaños, que van desde la dimensión del flujo (tamaño del contenedor) hasta el tamaño más pequeño (escala de Kolmogorov).
- Mantenimiento autónomo: Un flujo turbulento puede mantenerse turbulento a sí mismo. Los remolinos grandes generan remolinos pequeños.
- Disipación: La ruptura sucesiva de vórtices a escalas más pequeñas, llevará eventualmente a la generación de vórtices del tamaño de la escala de Kolmogorov. Una vez alcanzado este tamaño, el movimiento se disipa por el efecto de la viscosidad. En otras palabras, un flujo turbulento decaerá progresivamente a menos que exista un mecanismo de entrada de energía.
- Transiente: La turbulencia es un fenómeno que presenta variaciones en el tiempo.

2.6.2 Análisis del flujo turbulento

En CFD existen modelos de turbulencia que tratan de representar la presencia de la turbulencia en el flujo. Encontramos tres estrategias numéricas para el modelado de turbulencia:

2.6.2.1 RANS (*Reynolds Averaged Navier- Stokes*)

- La turbulencia es modelada usando las ecuaciones RANS.
- Los modelos k-epsilon, k-omega y Spalart-Allmaras forman parte de esta estrategia.
- Es la estrategia más empleada en CFD.

2.6.2.2 LES (*Large Eddy Simulation*)

- Representa el comportamiento de los vórtices de mayor escala. Se calculan las grandes escalas y las menores se modelan.
- La malla del dominio ha de ser mucho más pequeña que en los modelos basados en RANS y ya que no se utiliza promedios en el tiempo, requiere de pequeños intervalos de tiempo para el seguimiento.
- La malla debe ser muy refinada y requiere más esfuerzo computacional que la estrategia RANS. Se suele usar en los casos transientes.
- Es menos caro que el DNS, pero la cantidad de recursos y esfuerzo computacionales son aún lejanos para la mayoría de las aplicaciones prácticas.

2.6.2.3 DNS (*Direct Numerical Simulation*)

- Resuelve todo el espectro de escalas. No se requiere modelado.
- El uso de esta técnica solo está reservado para investigaciones de alto nivel con supercomputadores.
- El costo es demasiado alto. Esta estrategia implica mallas con un número muy elevado de elementos, ya que es impracticable para los casos reales.

En la Figura 2.8 se observa un ejemplo de aplicación de los modelos de turbulencia; es un flujo de chorro de agua y se desarrolla con mayor o menor precisión, dependiendo del modelo de turbulencia escogido,

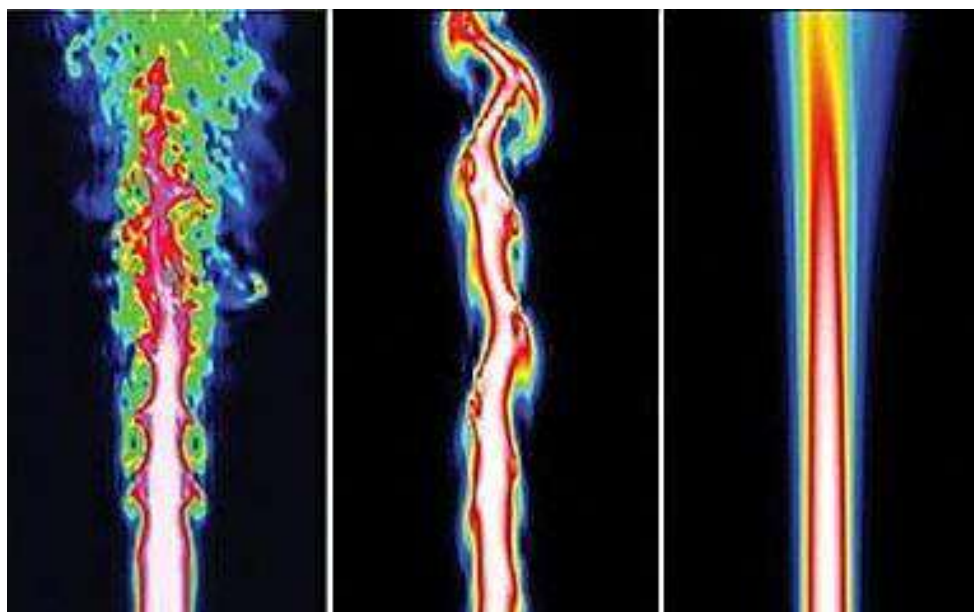


Figura 2. 8 Ejemplo de modelos de turbulencia, RANS (derecho), LES (centro) y DNS (izquierdo)

Fuente: (Maries, Haque, Yilmaz, NiK, & Marai)

2.7 Flujos Multifase

El flujo multifase se refiere a la situación en la que está presente más de un fluido. Hay cuatro categorías principales de flujos multifásico: gas-líquido, gas-sólido, líquido-sólido y trifásico.

Cada fluido puede poseer su propio campo de flujo, o todos los fluidos pueden compartir un campo de flujo común.

Debido a la complejidad del fenómeno, existen modelos que se utilizan para poder describir y predecir la física del flujo multifásico. Pueden contar con diferentes niveles de precisión para distintas aplicaciones de flujo multifásico.

Algunos de estos enfoques se mencionan a continuación: *Euler-Lagrange*, *Euler-Euler*, *Volumen of Fluid*, *Dispersed phase modelling*.

2.8 Método numérico

Es imprescindible un método numérico apropiado para la solución del problema. Hay muchos enfoques, pero los más importantes entre ellos son: el método de diferencias finitas (FD), de volúmenes finitos (FV), y de elementos finitos (FE).

2.8.1 Método de diferencias finitas

Utilizan la formulación diferencial de las ecuaciones. El dominio se cubre con puntos llamados nodos en los cuales la ecuación es aproximada. Se realiza remplazando las derivadas parciales por aproximaciones en términos de los valores nodales de la función. Cuando se aplican en mallas estructuradas son muy sencillos y efectivos. Además es fácil obtener esquemas de alto orden. Entre sus inconvenientes están que la conservación no está garantizada y es complicada su aplicación a dominios de geometrías irregulares.

2.8.2 Método de volúmenes finitos

Utilizan la formulación integral de las ecuaciones. El dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se aplican las ecuaciones integrales, las cuales son aproximadas mediante cuadraturas. En este caso, los nodos residen en el centroide del volumen y se interpolan para obtener sus valores en las caras de aquellos. Se pueden usar cómodamente en todo tipo de mallas, tanto estructuradas como no estructuradas. Otra de sus ventajas es que son conservativos por construcción y todos los términos aproximados tienen un sentido físico claro. Entre sus desventajas está la dificultad de obtener esquemas de alto orden, sobre todo en 3D, debido a que requieren tres niveles de aproximación: interpolación, diferenciación e integración. Es el método utilizado por la mayoría de softwares CFD (ANSYS, STAR CCM+, OPENFOAM, etc).

2.8.3 Método de elementos finitos

Utilizan la formulación débil: la ecuación diferencial es multiplicada por unas funciones llamadas funciones peso y posteriormente integradas. Son similares en cierto modo al método de volúmenes finitos. El dominio se divide en elementos y en cada uno de ellos la solución es aproximada, generalmente de forma lineal, utilizando los valores de la función en los vértices del elemento. Esta aproximación es sustituida en la ecuación integral pesada y se impone que la derivada de dicha integral con respecto al valor en cada nodo sea cero. Son apropiados para geometrías complejas y fáciles de analizar matemáticamente. Menos común en CFD pero también se pueden encontrar paquetes de software como ELMER, FENICS, etc.

2.9 Softwares de modelación numérica¹³

CFD cuenta con una amplia gama de softwares de simulación numérica, tanto en 1,2 ó 3D. A continuación se muestran algunos de los más utilizados en el estudio de la Flujodinámica:

¹³ Este apartado se ha realizado utilizando la referencia (Ojeda, 2003).

2.9.1 HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*) sirve para flujos unidimensional no permanente, sin transporte de sedimentos y con capacidad para trabajar con flujos mixtos subcrítico y supercrítico.

Modela estructuras fluviales como diques, puentes, alcantarillas y barrajes. La erosión local en pilares de puentes puede ser calculado mediante los procedimientos recomendados por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) de Estados Unidos.

2.9.2 BRI-STARS

BRI-STARS (*Bridge-Stream Tube Aluvial River System*) tiene la capacidad para simular las variaciones del lecho en los ríos para los cuales los datos del sedimento y los datos hidráulicos son limitados.

Permite calcular la variación lateral y longitudinal de condiciones hidráulicas, así como la actividad del sedimento en las diversas secciones transversales a lo largo del alcance del estudio. Simula problemas del transporte de sedimento, para los cuales hay interacción entre la mezcla del agua-sedimento que fluye y los límites aluviales del cauce del río. Para lograr este propósito, los cálculos del perfil de la superficie del agua y otras variables hidráulicas en régimen supercrítico, subcrítico y combinaciones de ambas condiciones, se debe realizar en forma continua. El acorazamiento del lecho y su ruptura está también incorporado.

El programa es semi-bidimensional con la tercera dimensión, la profundidad, incorporado en forma intrínseca en los cálculos. Como tal, tiene las limitaciones básicas de todo programa de dos dimensiones: los flujos secundarios no pueden ser simulados. Su uso permite la variación de la condiciones y de la actividad hidráulicas del sedimento no solamente en la dirección longitudinal, sino también en la dirección lateral.

Debido a que los cambios de la elevación del lecho no se promedian en toda la sección como en modelos unidimensionales, se logra simular una erosión o sedimentación más realista del cauce.

2.9.3 FESWMS-2DH

FESWMS-2DH (*Finite Element Surface-Water Modeling System*), es un modelo en elementos finitos de flujo bidimensional en el plano horizontal desarrollado por el FHWA, para la modelación de condiciones hidráulicas complejas en estructuras hidráulicas de cruce de carreteras, como puentes y alcantarillas, donde el análisis convencional basado en cálculos unidimensionales no proporciona suficiente nivel de detalle para los objetivos del estudio.

El modelo puede simular el flujo bajo puentes y alcantarillas, pero también por encima del terraplén de la carretera en caso de avenidas extraordinarias.

Ojeda, J.A (2003) realizó la modelación numérica de un tramo del río tumbes utilizando FESWMS-2DH, se muestra en la Figura 2.9.

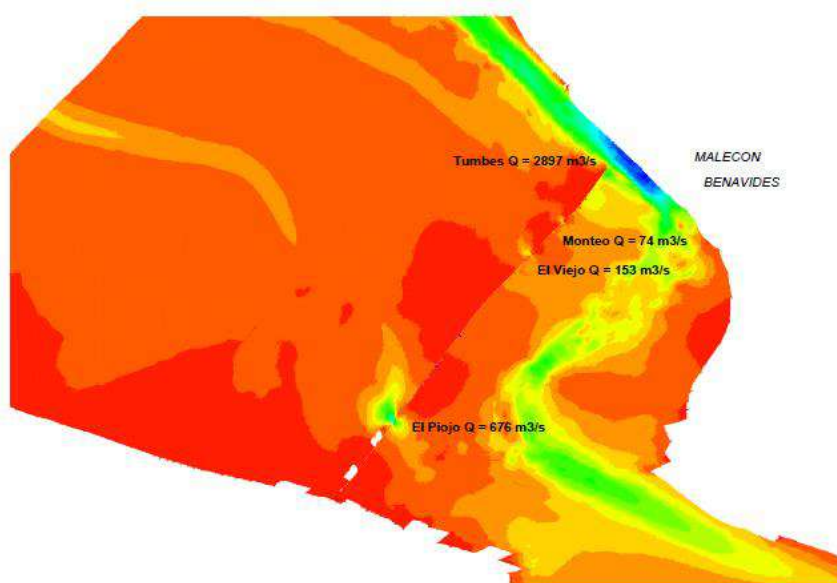


Figura 2. 9 Modelación numérica del río tumbes utilizando FESWMS
Fuente: (Ojeda, 2003)

2.9.4 RMA-2

RMA-2, es un modelo hidrodinámico bidimensional promediado en profundidad mediante elementos finitos. Calcula los niveles de agua y las componentes de la velocidad en el plano horizontal, para flujo subcríticos con superficie libre.

2.9.5 RIVER-2D

RIVER-2D, un modelo hidrodinámico bidimensional promediado en profundidad mediante elementos finitos desarrollado por la Universidad de Alberta en Canadá. Posee características únicas como su capacidad de trabajar tanto con flujo transcrito; es decir sub- y supercrítico. Algoritmos especiales de agua subterránea permiten una transición gradual entre agua superficial y subterránea en los bordes del río, que evitan quiebres bruscos en las fronteras.

2.9.6 SSIMM

SSIMM (*Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option*), se desarrolló por la Universidad de Trondheim en Noruega. Este software calcula el flujo de sedimentos y la calidad de agua en tres dimensiones, resolviendo la ecuación de *Navier-Stokes* junto con el modelo de turbulencia *k-epsilon*.

Las ecuaciones de convección-difusión se resuelven para calcular el transporte de sedimentos así como el transporte de constituyentes en estudios de calidad de agua. Los cálculos son dependientes del tiempo. Un mallado vertical móvil toma en cuenta los cambios en el nivel del agua y del lecho. El programa se basa en el método de volúmenes finitos por lo que se debe generar un mallado tridimensional.

Ojeda, J.A (2003) realizó la modelación numérica de un tramo del río tumbes utilizando, SSIMM, se muestra en la Figura 2.10.

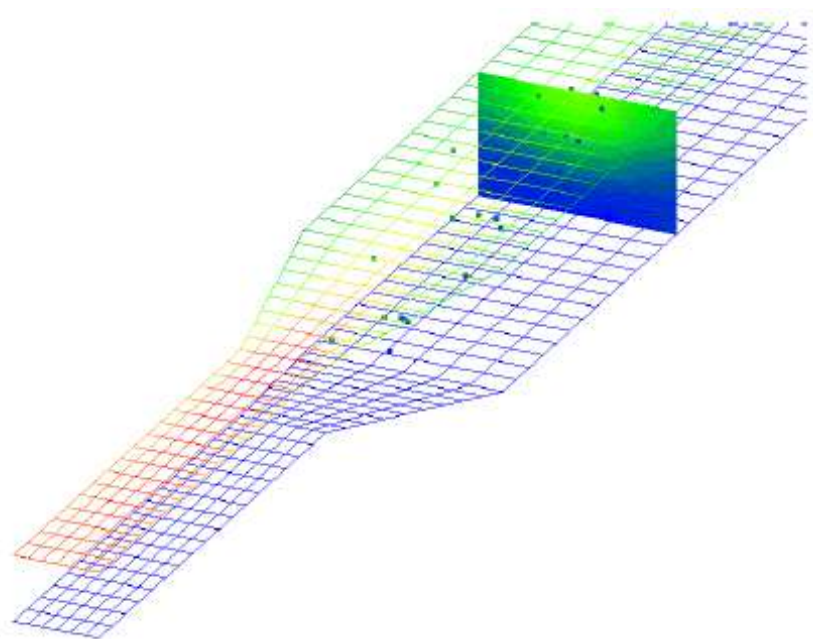


Figura 2. 10
Fuente: (Ojeda, 2003)

2.9.7 ANSYS CFX

ANSYS CFX, forma parte de la suite del software ANSYS. Combina un solver avanzado con poderosas capacidades de preprocesamiento y postprocesamiento. Es el software utilizado para la presente tesis. Más detalle sobre el software se explicará en el Capítulo 3.

Capítulo 3

ANSYS CFX¹⁴

3.1 Introducción

ANSYS CFX es un software de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) de uso general, porque se puede utilizar para analizar muchos problemas del flujo de fluidos, y además es práctico, porque su interface de modelación tridimensional es atractiva para el usuario, utilizando menús y gráficos avanzados.

Es capaz de modelar: flujos estacionarios y transitorios, flujos laminares y turbulentos, flotabilidad, flujos no newtonianos, flujos multifásico, combustión, seguimiento de partículas, etc.

3.2 Estructura de modelación

Para realizar una simulación en ANSYS CFX y poder aplicar el análisis flujodinámico, se debe seguir la siguiente estructura:

- A) Identificación del problema
 - Definir los objetivos
 - Identificar el dominio de cálculo
- B) Pre-proceso
 - Geometría
 - Malla
 - Física del modelo
 - Configuración del modelo
- C) Proceso
 - Cálculo de la solución
- D) Post-proceso
 - Calibración y validación del modelo

¹⁴ Este capítulo se ha realizado utilizando la siguiente referencia (SHARCNET).

3.2.1 Identificación del problema

3.2.1.1 Definir los objetivos

- Introducir los parámetros de salida de los análisis y modelos físicos necesarios.
- Realizar posibles simplificaciones.
- El nivel de precisión que se requiere, lo cual está directamente relacionado con la capacidad de memoria y el tiempo de simulación.

3.2.1.2 Identificar el dominio de cálculo

En muchos casos no es necesario simular un sistema global, sino elegir una parte determinada. Es importante verificar si se tiene la información necesaria para implementar las condiciones de frontera para la simulación. En caso que no se tenga, analizar si el dominio de cálculo se puede extender a una zona donde se tenga la información. Por último, evaluar si el modelo se puede reducir, por ejemplo realizar una simulación en dos dimensiones (2D).

3.2.2 Pre proceso

3.2.2.1 Geometría

Es importante definir cómo se obtendrá las dimensiones de la geometría, por ejemplo, si se va a obtener la geometría del fluido a partir de un sólido ya existente, qué tipo de software CAD (*Computer-aided design*) se va a utilizar, etc. Además, se puede simplificar la geometría, por ejemplo, removiendo partes complejas de ésta que pueden complicar la tarea del mallado.

La obtención del volumen de control del fluido se puede conseguir con cualquier software CAD, por ejemplo, Solid Works, Autodesk Inventor, Solid Edge, AutoCAD 3D, SpaceClaim, etc.

En este proyecto, para evitar desperfectos en la generación de la geometría, se realizó el modelamiento de todo el dominio con el software de modelamiento *Desing Modeler* (DM), generador CAD de ANSYS.

3.2.2.2 Malla

Una malla es la representación discretizada del dominio y debe ser capaz de capturar gradientes de interés, como por ejemplo: velocidad, presión, temperatura, etc. Hay que elegir la malla más apropiada, lo cual incluye: analizar la complejidad de la geometría del dominio de cálculo y el tipo de elementos (Figura 3.1) que se utilizará en el mallado.

Existen muchas formas diferentes de elementos que conforman una malla. Los más utilizados son los siguientes:

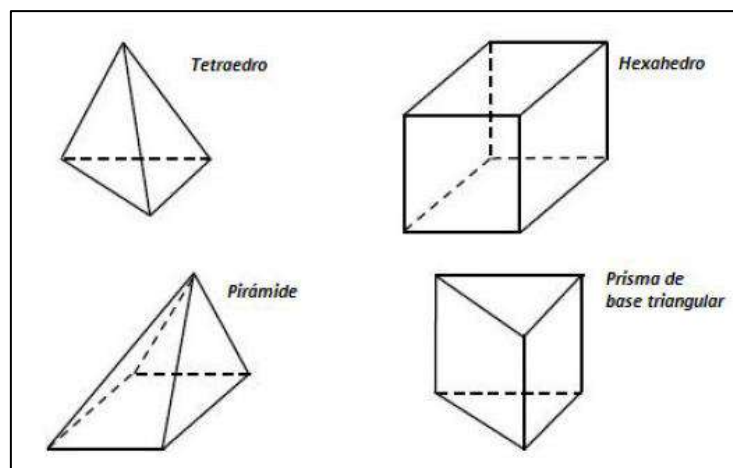


Figura 3.1 Tipos de elemento principales en una malla
Elaboración: Propia

Las decisiones deben tomarse con base en: la capacidad de los recursos informáticos (*hardware*), la precisión requerida, disponibilidad del tiempo de convergencia de la malla.

3.2.2.3 Física y configuración del solucionador

Se tienen que definir:

- Las propiedades de los materiales tanto de sólidos, líquidos y gases.
- Los modelos físicos: turbulencia, flotabilidad, multifase, etc.
- Las condiciones de frontera (velocidad, flujo másico, presión, simetría, periodicidad, etc.) que serán utilizadas en el modelo.
- Proveer valores iniciales para la primera iteración.
- Los valores para la convergencia de la simulación.

3.2.3 Proceso

El componente que resuelve los problemas de CFD se llama *solver*. Un problema de CFD se resuelve de la siguiente forma:

1. Las ecuaciones diferenciales parciales se integran sobre todos los volúmenes de control en la región de interés. Esto es equivalente a la aplicación de una ley de conservación de base (por ejemplo, para la masa o cantidad de movimiento) para cada volumen de control.
2. Estas ecuaciones integrales se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas mediante la generación de un conjunto de aproximaciones para los términos de las ecuaciones integrales.
3. Finalmente, las ecuaciones algebraicas se resuelven iterativamente.

Es necesario un enfoque iterativo debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones; cuando la solución se aproxima a la solución exacta, se dice converger. Encontrar la solución exacta depende de un número de factores, incluyendo el tamaño y

forma de los volúmenes de control y el tamaño de los residuos finales. Finalmente, el solucionador genera un archivo de resultados para el post-procesamiento.

3.2.4 Post proceso

El post procesador es el componente utilizado para analizar, visualizar y presentar los resultados de forma interactiva. El post-procesamiento incluye cualquier cosa, desde la obtención de valores de puntos hasta complejas secuencias animadas.

Ejemplos de algunas características importantes de los post procesadores son:

- Visualización de los volúmenes de geometría y control
- Gráficos vectoriales que muestran la dirección y magnitud del flujo
- Visualización de la variación de variables escalares (variables que sólo tienen magnitud, no dirección, como temperatura, presión y velocidad) a través del dominio
- Cálculos numéricos cuantitativos
- Animación
- Gráficos que muestran gráficas de variables.

3.3 Método numérico

Soluciones analíticas de las ecuaciones de Navier-Stokes se han desarrollado sólo para flujos en geometrías simples y bajo condiciones ideales, debido a lo anterior la utilización de métodos numéricos para resolver flujos reales en geometrías complejas se ha hecho imprescindible. El método de volúmenes finitos (*Finite Volume Method* – FVM en su sigla en inglés) fue introducido en la década de 1970 por McDonald, MacCormack, y Paullay e históricamente ha sido el método preferido por los científicos e ingenieros que trabajan con la mecánica de fluidos.

El proceso consiste:

1. Descomponer el dominio en volúmenes de control
2. Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control
3. Aproximar numéricamente las integrales
4. Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales
5. Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido.

La Figura 3.2 muestra un ejemplo de una malla en dos dimensiones. Todas las variables de soluciones y propiedades de los fluidos se almacenan en los nodos (vértices de

mall). Un volumen de control (el área sombreada) se construye alrededor de cada nodo de la malla (definida por las líneas que unen los centros de los bordes y los centros de los elementos que rodean el nodo).

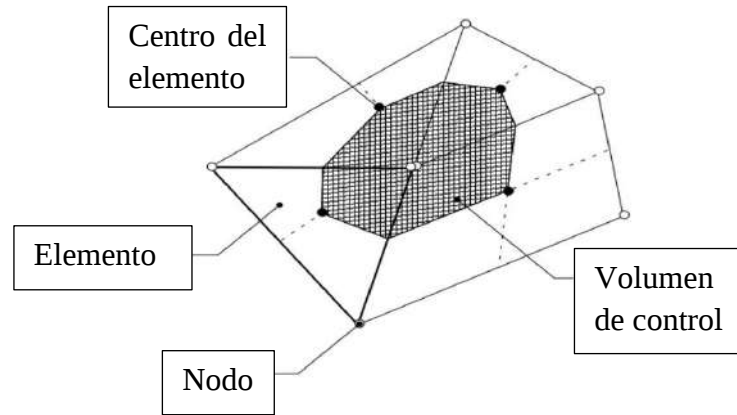


Figura 3.2 Definición del volumen de control
Fuente: (ANSYS,INC, 2013)

Después de haber definido los VCs, las ecuaciones diferenciales de conservación son descritas en su forma integral para cada volumen. Por ejemplo la ecuación general de transporte:

$$\frac{d\rho\phi}{dt} + \nabla \cdot (\rho v\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (3.1)$$

La Ecuación 3.1 es general y puede tener la forma de la ecuaciones de continuidad, momentum y energía, tomando como valor de ϕ : Continuidad: 1, Momentum: u , v , w y Energía: h , respectivamente.

Se transforma en:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho\phi dV + \oint_A \rho v\phi \cdot dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi \quad (3.2)$$

Donde, ϕ es la variable transportada a través de un medio de densidad ρ y constante de difusión Γ que se mueve a una velocidad v con un término fuente S_ϕ . Las integrales de volumen representan los términos de origen o de acumulación y las integrales de superficie representan la suma de los flujos.

Para la obtención final del sistema algebraico (Ecuación 3.3) de ecuaciones integrales, las integrales son aproximadas de la siguiente forma: las volumétricas haciendo un cálculo simple basado en las variables nodales, y las superficiales aproximándolas por los balances a través de las caras de los VCs.

En dicho proceso, las aproximaciones de las variables en las caras y de los gradientes son hechas en función de las variables nodales.

$$V_{celdas} \cdot \frac{d\rho\phi}{dt} + \sum_f^{N_{caras}} \rho_f V_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{caras}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot A_f + S_\phi \cdot V_{cell} \quad (3.3)$$

Finalmente, todas las ecuaciones algebraicas son resueltas iterativamente.

3.4 Modelo de turbulencia

Se han desarrollado varios modelos que pueden utilizarse para aproximar turbulencias basadas en las ecuaciones *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Algunos tienen aplicaciones muy específicas, mientras que otros pueden aplicarse a una clase más amplia de flujos con un grado razonable de confianza. Los modelos se pueden clasificar como modelos *Eddy-viscosity* y *Reynolds stress*. Los siguientes modelos de turbulencia basados en las ecuaciones RANS están disponibles en ANSYS CFX y se describen a continuación:

a) *Eddy-viscosity models*:

- *Zero equation model.*
- *Standard $k - \varepsilon$ model.*
- *RNG $k - \varepsilon$ model.*
- *Standard $k - \omega$ model.*
- *Baseline (BSL) zonal $k - \omega$ based model.*
- *SST zonal $k - \omega$ based model.*

b) *Reynolds stress models (RSM)*:

- *Launder, Reece and Rodi Isotropization of Production model (LRR Reynolds Stress).*
- *Launder, Reece and Rodi Quasi-Isotropic model (QI Reynolds Stress).*
- *Speziale, Sarkar and Gatski (SSG Reynolds Stress).*
- *SMC- ω model (Omega Reynolds Stress).*
- *Baseline (BSL) Reynolds stress model.*
- *Explicit Algebraic Reynolds stress model (EARS).*

CFX también proporciona los modelos de turbulencia de *Large Eddy Simulation* (LES) y de *Detached Eddy Simulation* (DES). Esta clase de modelos de turbulencia no se basa en las ecuaciones de RANS.

Todos los modelos de turbulencia en CFX usan funciones avanzadas de pared para modelar el flujo de cerca de la pared.

3.5 Modelo multifase

ANSYS CFX incluye una variedad de modelos multifase para permitir la simulación de múltiples corrientes de fluidos, burbujas, gotas, partículas sólidas y flujos de superficie libre. Se pueden utilizar junto con varios modelos subsidiarios para modelar flujo disperso, mezclas de fluidos continuos, etc. Dependiendo de los tipos de fases, por ejemplo fluido continuo o disperso, se disponen de diferentes modelos de transferencia de interfase.

Los modelos multifase disponibles en CFX se describen a continuación;

3.5.1 Modelo no homogéneo

El modelo no homogéneo se basa en el enfoque de Euler-Euler. En los modelos Euler-Euler todas las fases son tratadas como continuas. Por eso, estos modelos a menudo también se llaman modelos multi-fluidos. Los modelos multi-fluidos son apropiados para flujos separados donde ambas fases pueden ser descritas como un continuo. Sin embargo, el enfoque de Euler-Euler también puede usarse para modelar flujos dispersos cuando el movimiento general de las partículas es de interés en lugar de rastrear partículas individuales. Las ecuaciones de fase dispersa se promedian en cada celda computacional. Para poder describir una fase dispersa como continua, la fracción volumétrica debe ser alta y por lo tanto, este enfoque es adecuado para los flujos densos. Las fases se tratan por separado y se resuelve un conjunto de ecuaciones de conservación para cada fase. El acoplamiento entre las fases se logra a través de una presión compartida y coeficientes de intercambio de interfase. Los coeficientes de intercambio de interfase necesitan ser modelados. Es de ayuda para modelar fluidos con un amplio rango de concentración de partículas ya que permite capturar el efecto del acoplamiento fluido-partícula y la interacción entre las partículas, pero se limita solo a sistemas con una distribución granulométrica pequeña. Por cada tamaño de partícula es necesario incluir un juego de ecuaciones de conservación, lo que aumenta el costo computacional de manera rápida, y hace conveniente definir un tamaño representativo de partículas para utilizar este método. Ejemplo del modelo Euler-Euler, podemos mencionar: flujo de burbujas, flujo de gotas, etc.

3.5.2 Modelo homogéneo

El modelo homogéneo corresponde a un modelo *Volumen of Fluid* (VOF). La VOF pertenece a la estructura de Euler-Euler donde todas las fases son tratadas como continuas, pero no permite que las fases se interpenetren. El método VOF utiliza una función de indicador de fase, a veces también es llamada función de color, para rastrear la interfaz entre dos o más fases. La función de indicador tiene valor uno o cero cuando un volumen de control se llena completamente con una de las fases y un valor entre uno y cero si una interfaz está presente en el volumen de control. Como el enfoque del método VOF es rastrear la interfaz entre dos o más fases, es adecuado para flujos con interfaces nítidas, como ejemplo: flujos en superficie libre, flujo estratificado, etc.

Capítulo 4

Investigación

4.1 Descripción del problema

Se investigará el efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce. Para el estudio se analizarán individualmente dos pilares de sección rectangular no constante en profundidad. El primero, pilar con angostamiento en la parte baja (PAB) (Figura 4.1) y el segundo, pilar con angostamiento en la parte alta (PAA) (Figura 4.2). La vista frontal y sección transversal variable del pilar se muestran en la Figura 4.3 y Figura 4.4, respectivamente.

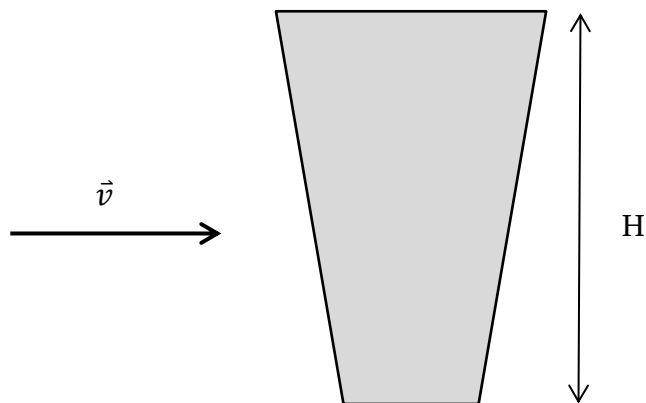


Figura 4.1 Perfil lateral. Pilar angosto en parte baja
Elaboración: Propia

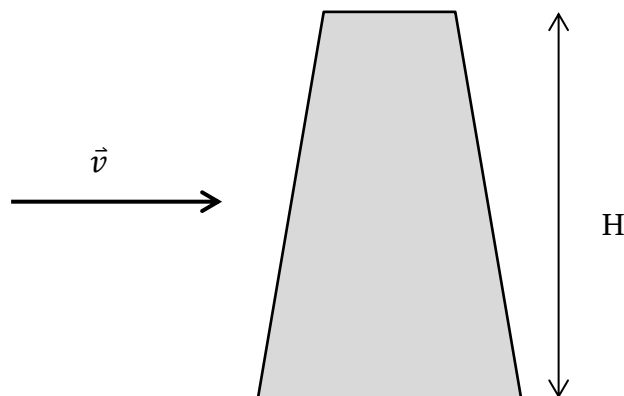


Figura 4.2 Perfil Pilar angosto en parte alta
Elaboración: Propia

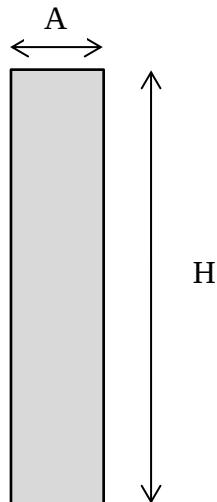


Figura 4.3 Pilar vista frontal. Flujo perpendicular al plano
Elaboración: propia

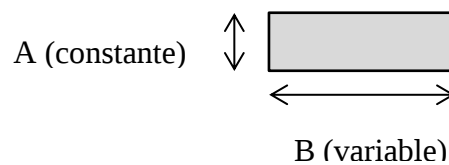


Figura 4.4 Pilar vista en elevación. Sección transversal rectangular
Elaboración: propia

El objetivo del presente estudio es comparar la flujodinámica del agua para ambos casos y evaluar cuál de los pilares influye más en la erosión del cauce. La investigación no se enfoca en el movimiento de las partículas del cauce, por ello, el cauce será rígido.

La investigación se realizará aplicando las técnicas de Dinámica Computacional de Fluidos mediante el software ANSYS CFX.

Ambas geometrías serán evaluadas en los siguientes ensayos:

- Ensayo A: Pilar sin foso de socavación
- Ensayo B: Pilar con foso de socavación

La flujodinámica del agua alrededor del pilar se evaluará dentro de un dominio de geometría simple, que permita visualizar los parámetros hidráulicos locales alrededor del pilar y no genere demasiado tiempo de modelación. Además, para simular el flujo de agua en superficie libre, estarán presente dos materiales: agua y aire.

4.2 Modelación Numérica

La modelación se realizará con el software ANSYS CFX el cual es un potente y flexible software de Dinámica Computacional de Fluidos de propósito general, utilizado para el modelado de flujos en superficie libre, turbulencia, etc.

Emplea el método de Volúmenes Finitos, el cual consiste:

- 1) Integración de las ecuaciones gobernantes del flujo de los fluidos para todos los volúmenes de control del fluido.
- 2) Estas ecuaciones integrales se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- 3) Finalmente, las ecuaciones algebraicas se resuelven iterativamente.

Desarrolla una serie de modelos, dentro de los cuales señalamos los más importantes para la investigación: modelo de turbulencia y modelo multifase.

En el modelo de turbulencia, se utilizará el modelo *K-epsilon* ($k - \varepsilon$), donde la primera variable " k " es la energía cinética turbulenta y la segunda, ε , es la disipación de la turbulencia. Se trata de un modelo ampliamente utilizado por necesitar pocos recursos y presentar una aceptable precisión para un amplio rango de flujos turbulentos.

En el modelo multifase, se utilizará el modelo homogéneo. Se trata de un modelo en el cual un campo de flujo común es compartido por todos los fluidos. Para un proceso de transporte dado, supone que las cantidades transportadas, con la excepción de la fracción volumétrica, son las mismas para todas las fases.

4.3 Ensayo sin foso de socavación

Este ensayo considera que el fondo del cauce no presenta profundización alrededor del pilar. Además, las líneas de corriente son perpendiculares al ancho del pilar.

4.3.1 Geometría

Utilizando la herramienta *Design Modeler*, generador CAD de Ansys, podemos realizar la geometría del dominio donde se desarrollará el flujo de agua y aire.

4.3.1.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). Las medidas del pilar son:

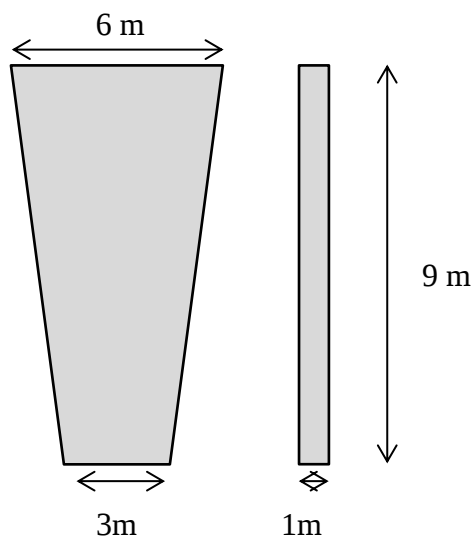


Figura 4.5 Vista del perfil (izquierda) y frontal (derecha) del PAB en Ensayo sin foso de socavación

Elaboración: Propia

Se procede a construir un volumen o dominio dentro del cual se desarrollarán las ecuaciones de transporte del agua y del aire. En la Figura 4.6, se muestra el dominio de color verde y plomo. También, se puede visualizar un volumen vacío dentro del bloque (Figura 4.7), este representa al pilar PAB; al ser un volumen sólido no forma parte de la solución, por ello, se extrae del volumen general. Además, en este caso no se ha representado el dominio dentro de la profundización o erosión alrededor del pilar, por ello, se observa una superficie plana en la parte baja del pilar (Figura 4.8)

La dimensiones del dominio, como lo son: longitud aguas arriba del pilar, longitud aguas abajo del pilar y lados del pilar, son apropiadas para que se pueda desarrollar el flujo.

Por último, la altura del dominio es determinada a partir de la altura del pilar. Las dimensiones se muestran en el Anexo C.

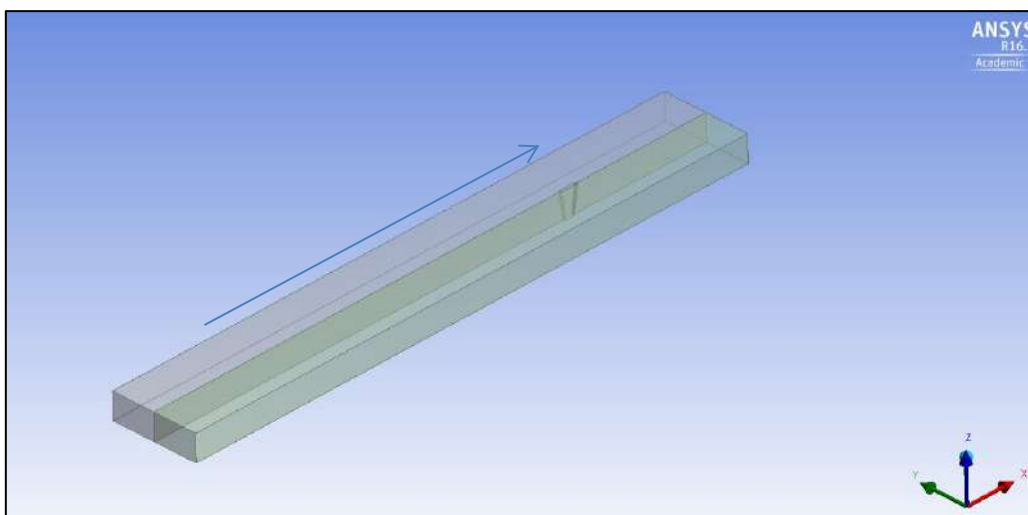


Figura 4.6 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

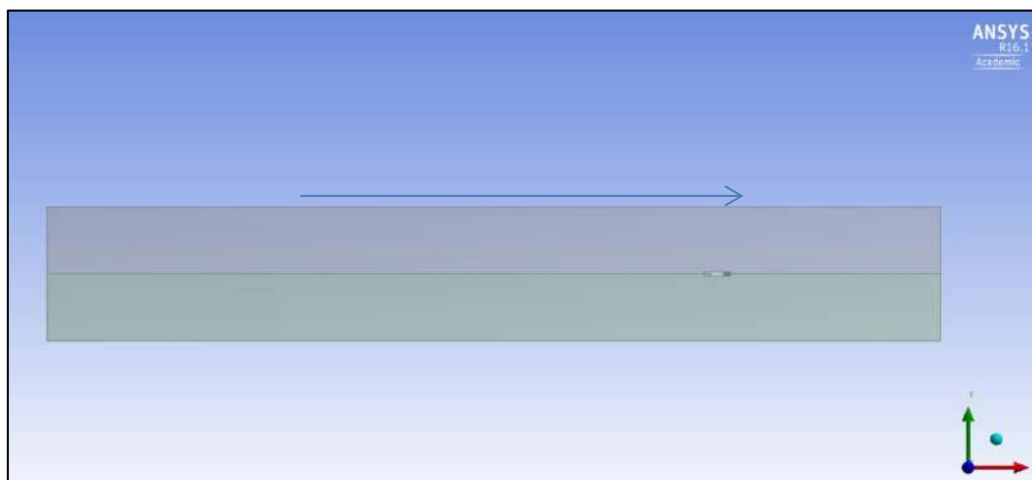


Figura 4.7 Vista en elevación del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

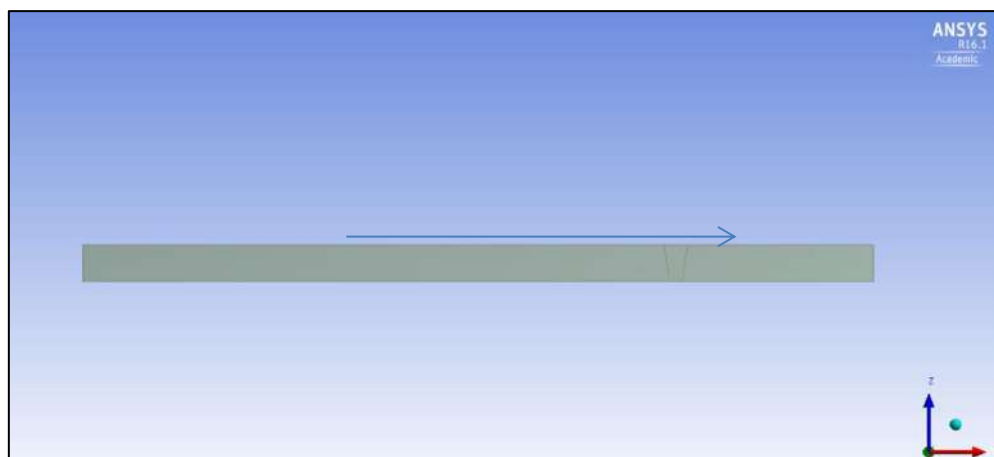


Figura 4.8 Vista lateral del dominio, el agua flujo se produce en la dirección del eje X.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Todo modelo numérico mientras más simplificado nos ahorrará tiempo de simulación y costo. El dominio al ser simétrico en ambos lados del pilar, se considera, presentará similares resultados a cada lado. Entonces, el dominio se simplifica y solo se considera para la simulación el bloque de color plomo. Lo anterior, se puede observar en la Figura 4.9 y Figura 4.10.

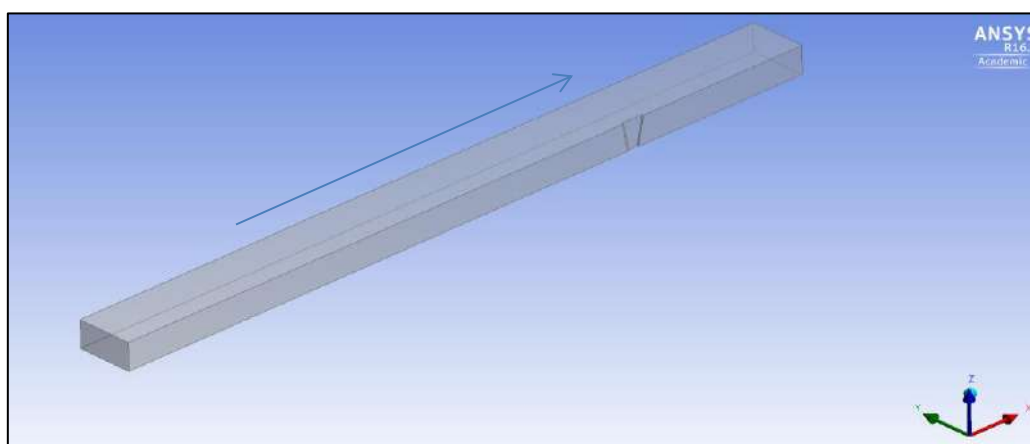


Figura 4.9 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia



Figura 4.10 Vista en elevación del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

4.3.1.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA) Las medidas del pilar son:

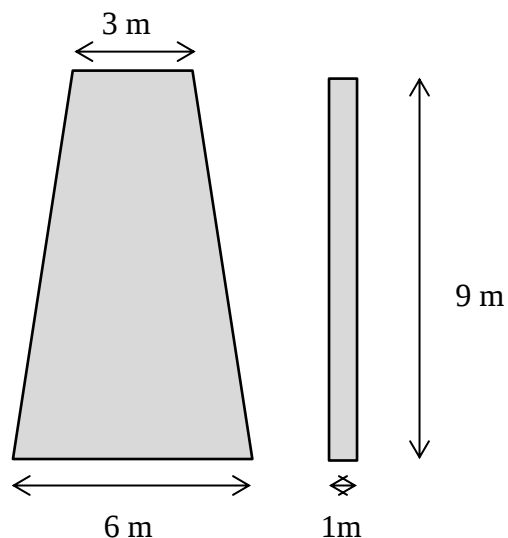


Figura 4.11 Vista del perfil (izquierda) y ancho (derecha) del PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Se procede a construir un volumen o dominio dentro del cual se desarrollarán las ecuaciones de transporte del agua y del aire. En la Figura 4.12, se muestra el dominio de color verde y plomo. También, se puede visualizar un volumen vacío dentro del bloque (Figura 4.13), este representa al pilar PAA; al ser un volumen sólido no forma parte de la solución, por ello, se extrae del volumen general. Además, en este caso no se ha representado el dominio dentro de la profundización o erosión alrededor del pilar, por ello, se observa una superficie plana en la parte baja del pilar (Figura 4.14). Las dimensiones del dominio, como lo son: longitud aguas arriba del pilar, longitud aguas abajo del pilar y lados del pilar, son apropiadas para que se pueda desarrollar el flujo. Por último, la altura del dominio es determinada a partir de la altura del pilar. Las dimensiones se muestran en el Anexo D.

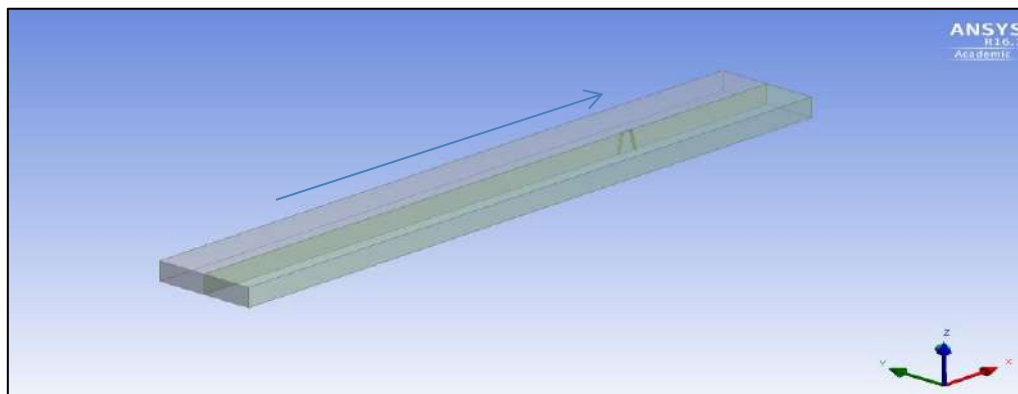


Figura 4.12 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

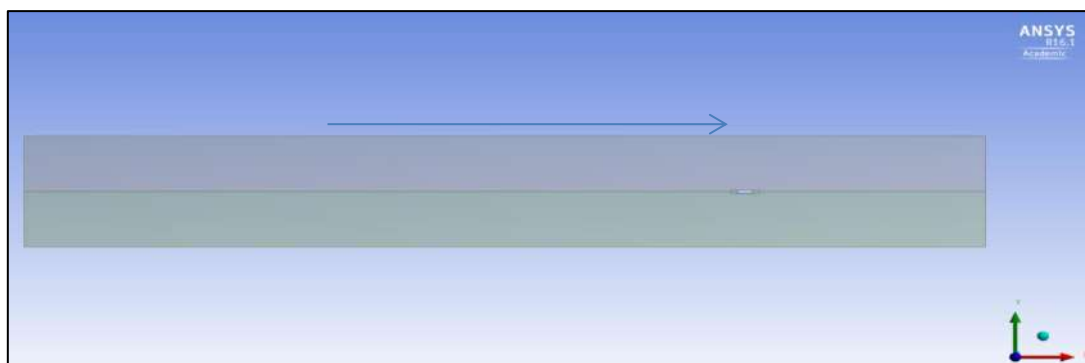


Figura 4.13 Vista en elevación del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

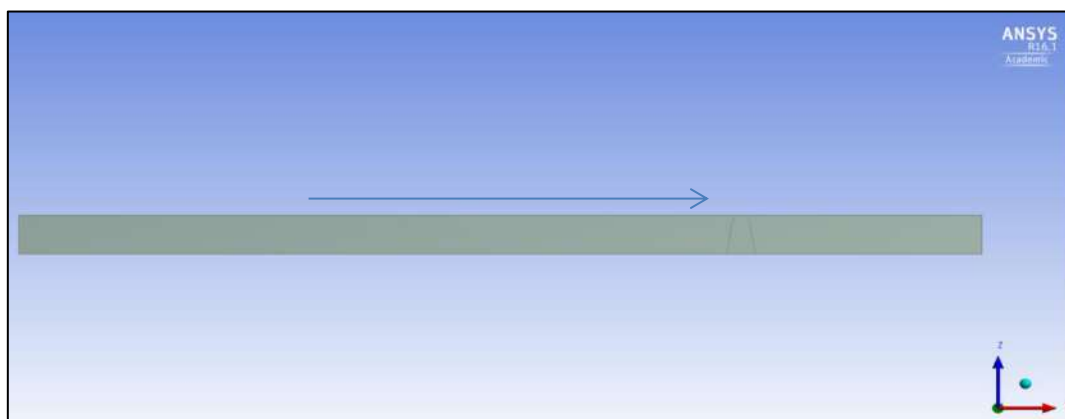


Figura 4.14 Vista lateral del dominio, el flujo se produce la dirección del eje X.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Todo modelo numérico mientras más simplificado nos ahorrará tiempo de simulación y costo. El dominio al ser simétrico en ambos lados del pilar, se considera, presentará similares resultados a cada lado. Entonces, el dominio se simplifica y solo se considera para la simulación el bloque de color plomo. Lo anterior, se puede observar en la Figura 4.15, Figura 4.16.

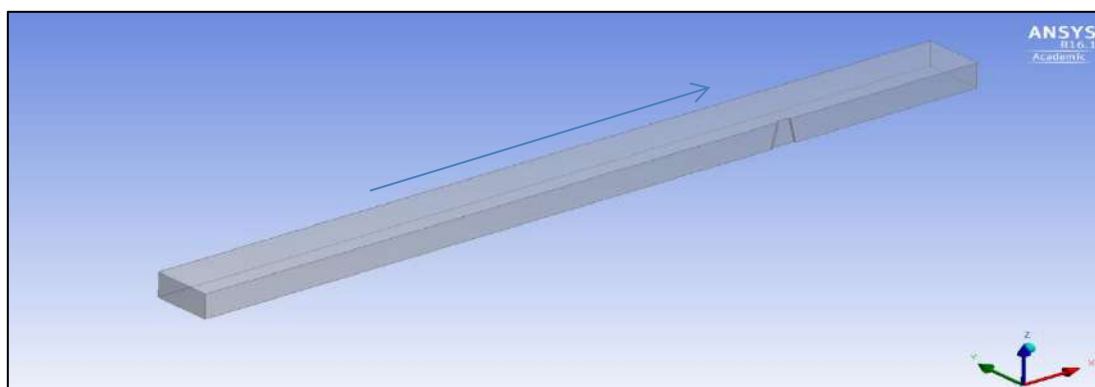


Figura 4.15 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X.PAA Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

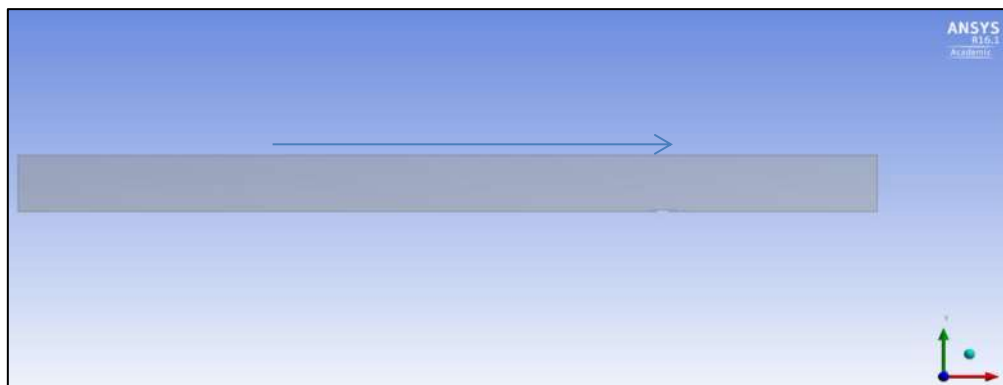


Figura 4.16 Vista en elevación del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

4.3.2 Superficies de frontera

Definida la geometría del dominio, se procede a dar nombre a todas las superficies de frontera y después, en la fase de física y configuración del solucionador, se les aplicará las condiciones de borde o valores de borde.

4.3.2.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). Cada superficie de frontera se selecciona de color rojo y se define con un nombre;

- Bed: cauce rígido.

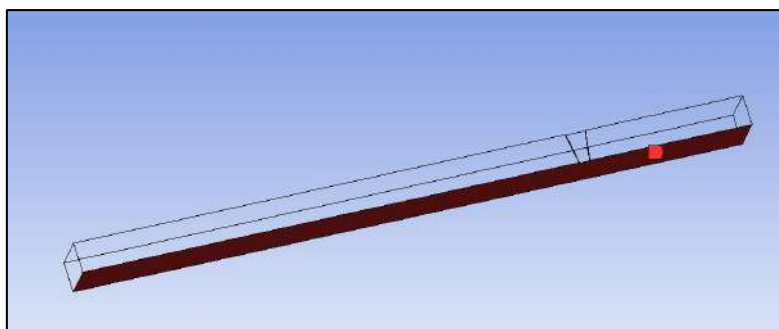


Figura 4.17 Superficie de frontera bed.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Inlet: ingreso de los flujos.

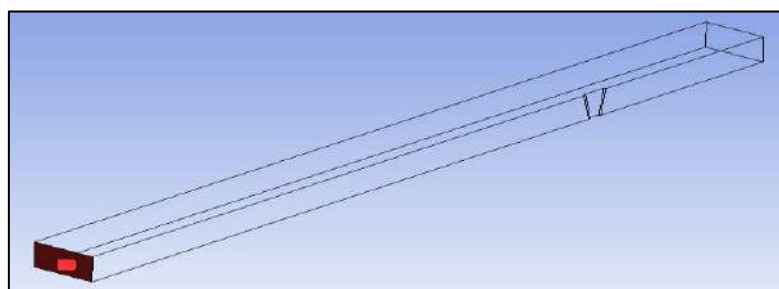


Figura 4.18 Superficie de frontera inlet.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Outlet: salida de los flujos.

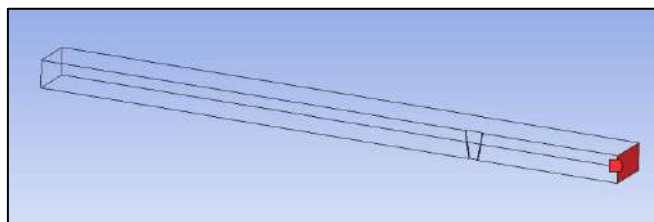


Figura 4.19 Superficie de frontera outlet.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Pilar: superficie de la estructura.

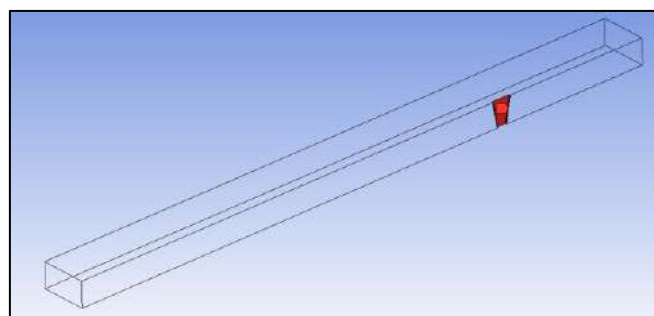


Figura 4.20 Superficie de frontera pilar.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Top: entrada de aire.

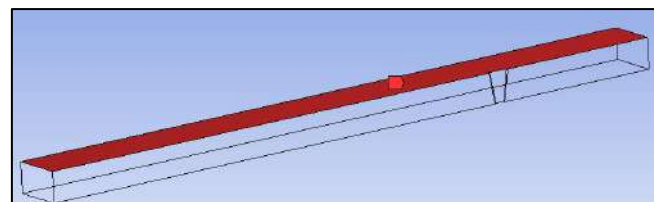


Figura 4.21 Superficie de frontera symmetry1.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 1: plano de simetría.

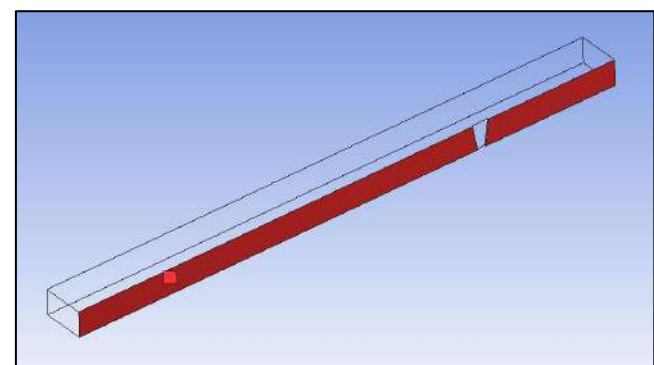


Figura 4.22 Superficie de frontera symmetry2.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 2: plano de simetría.

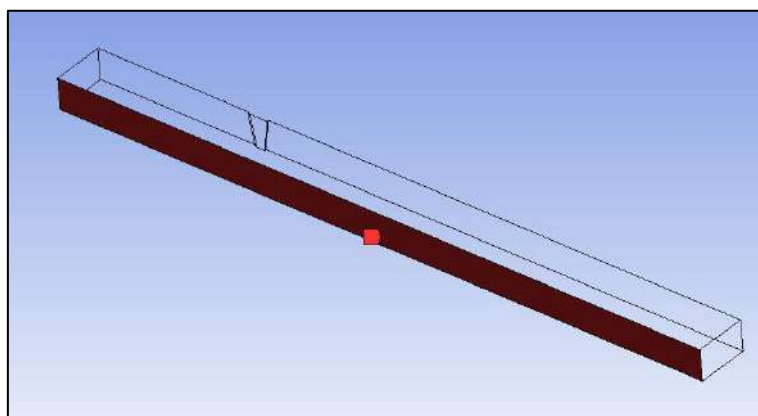


Figura 4.23 Superficie de frontera symmetry2.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

4.3.2.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA). Cada superficie de frontera se selecciona de color rojo y se define con un nombre;

Bed: cauce rígido.

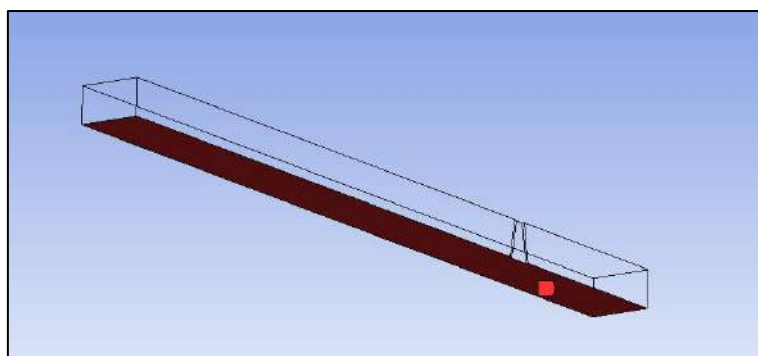


Figura 4.24 Superficie de frontera bed.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Inlet: ingreso de los flujos.

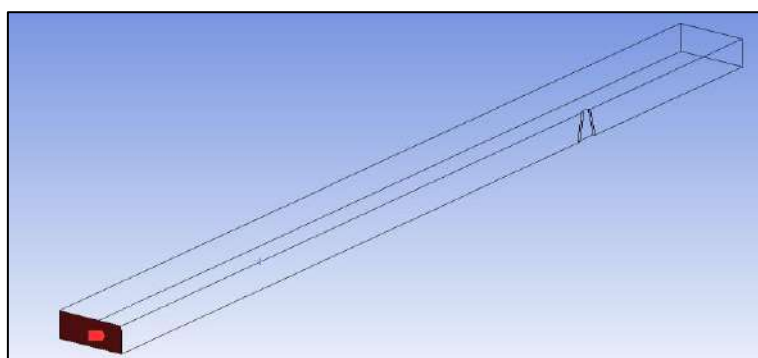


Figura 4.25 Superficie de frontera Inlet.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Outlet: salida de los flujos.

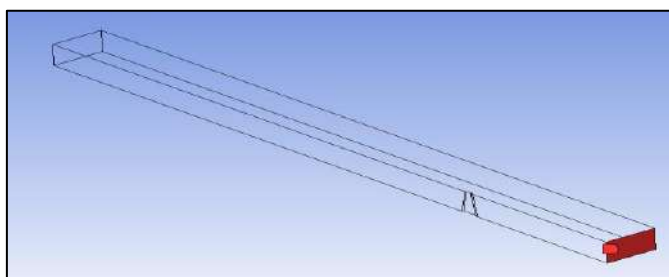


Figura 4.26 Superficie de frontera Outlet.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Pilar: superficie de la estructura.

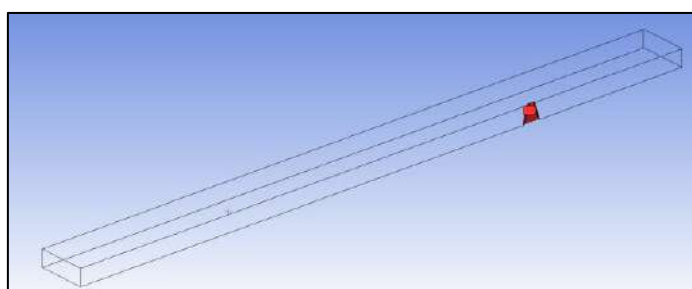


Figura 4.27 Superficie de frontera Pilar.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 1: plano de simetría.

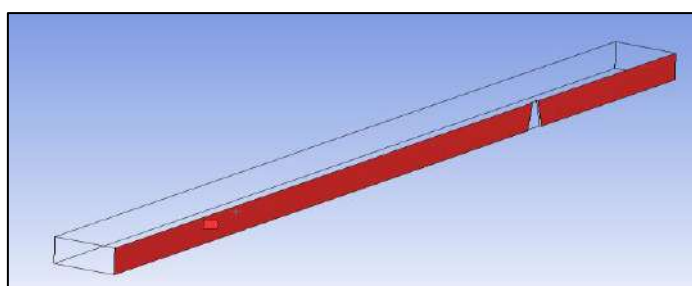


Figura 4.28 Superficie de frontera Symetry 1.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 2: plano de simetría

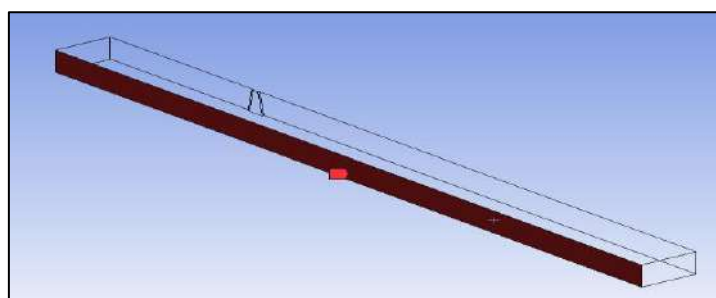


Figura 4.29 Superficie de frontera Symetry 2.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Top: entrada de aire

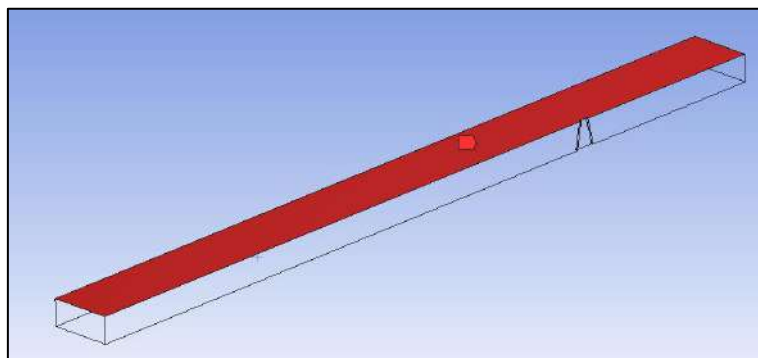


Figura 4.30 Superficie de frontera Top .PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

4.3.3 Mallado

La herramienta ANSYS-MESH es el componente de ANSYS CFX utilizado para crear el mallado del dominio. Se utiliza un mallado no muy fino, con el fin de realizar simulaciones en periodos cortos de tiempo. Además como se trata de una geometría sencilla, no es necesario tener una gran cantidad de elementos para poder observar el fenómeno en estudio.

En la Figura 4.31 se muestra el espacio de trabajo de ANSYS-MESH.

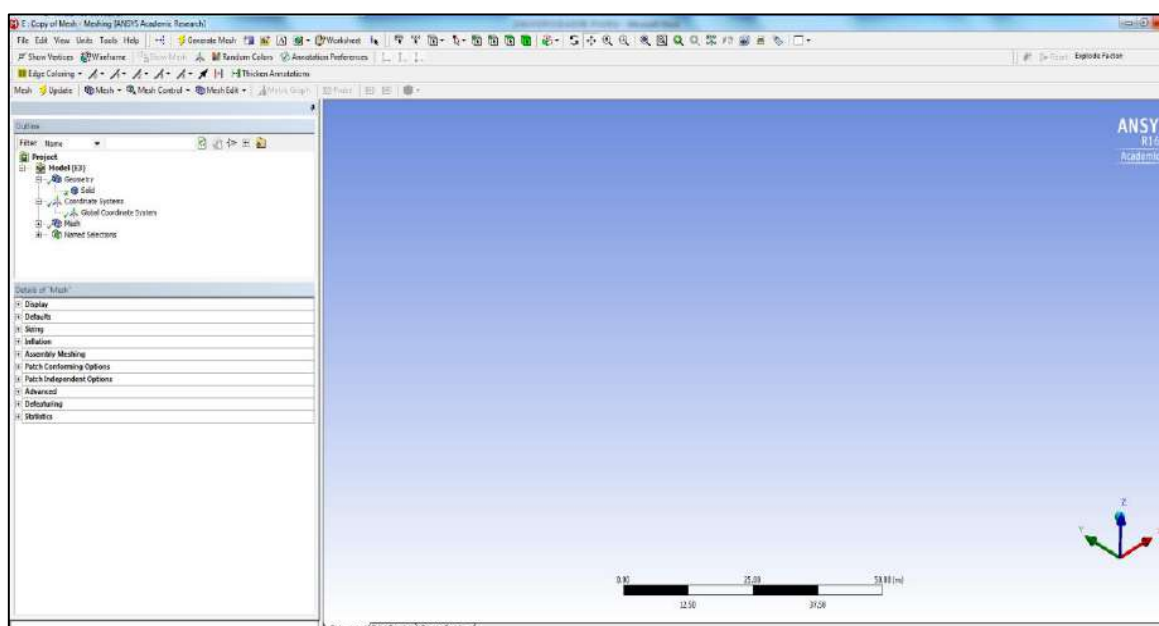


Figura 4.31 Espacio de trabajo Ansys Mesh
Elaboración: Propia

En ambos casos, la configuración de los detalles de la malla se realiza en la carpeta *Mesh*; cuyos parámetros son mostrados en la Figura 4.32. Algo importante de indicar es que éstos son parámetros generales, que pueden ser modificados en ciertas partes de la malla para mejorar su calidad, en donde sea necesario. Algunos parámetros que pueden modificarse se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetro de mallado para Ensayo sin foso de socavación.

Característica	Descripción
Solver Preference	CFX
Relevance	100
Advanced Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Smoothing	High
Transition	Slow
Max Face Size	0.50 m

Elaboración: Propia

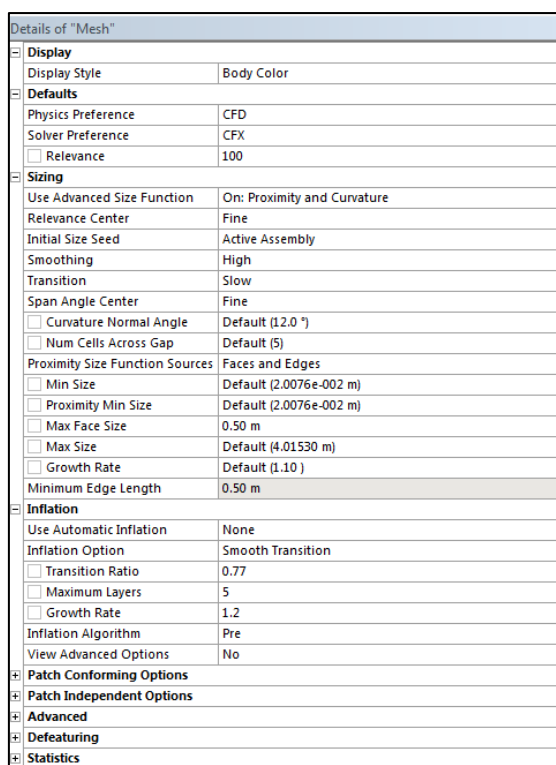


Figura 4.32 Interfaz de parámetros Mesh para Ensayo sin foso de socavación

Elaboración: Propia

En la Figura 4.33 se puede visualizar la diferencia de valores entre *coarse* y *fine* y además el nivel de *Relevance*.

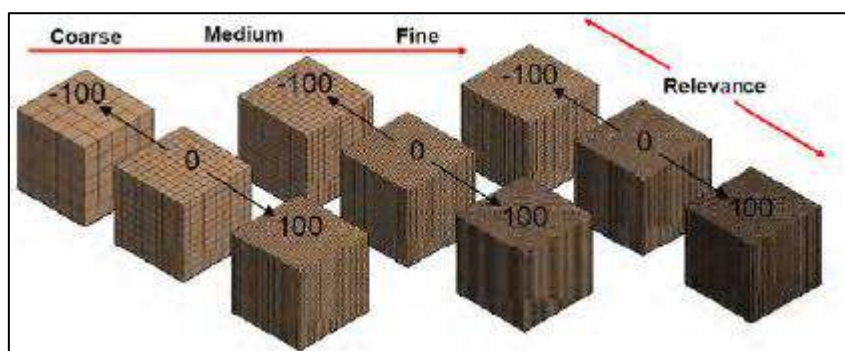


Figura 4.33 Refinado de mallado

Fuente: (ANSYS,INC, 2013)

4.3.3.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). En la Figura 4.34, Figura 4.35 y Figura 4.36 se puede observar el mallado del dominio. Se aprecia una zona más densa en las caras del pilar, porque se necesita desarrollar con mayor precisión los cambios de presión y velocidad producto del choque con el flujo.

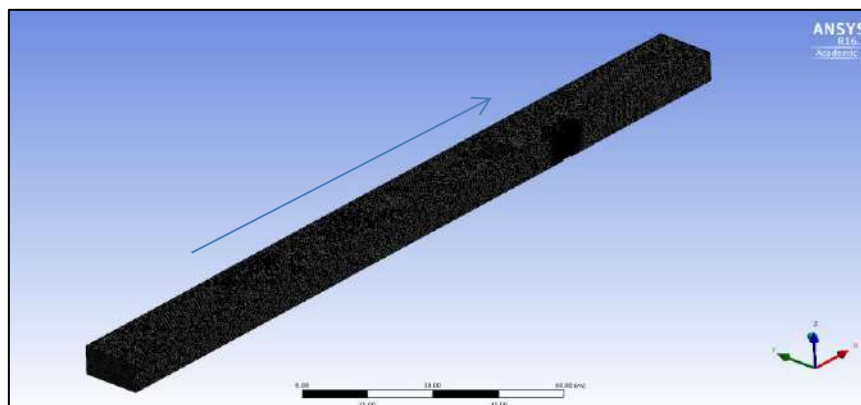


Figura 4.34 Malla PAB. Ensayo sin foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

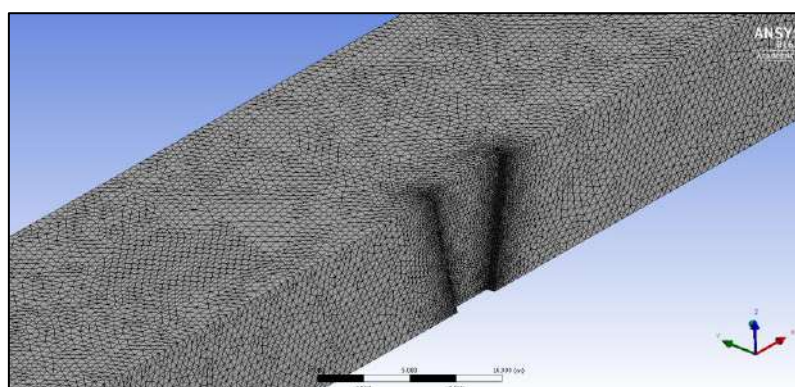


Figura 4.35 Malla PAB. Ensayo sin foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

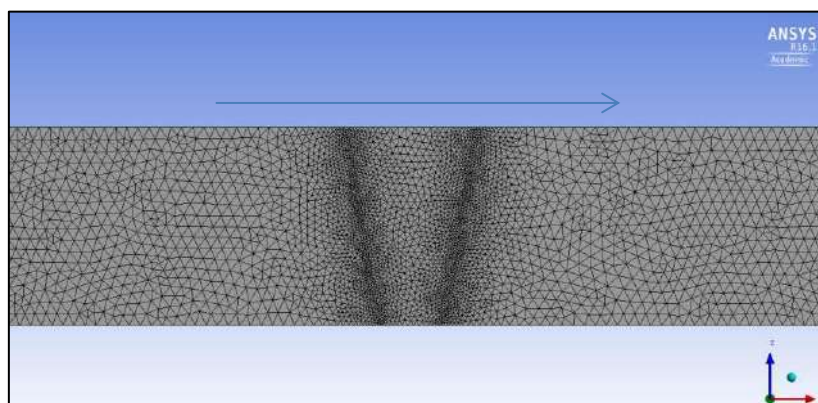


Figura 4.36 Malla PAB. Ensayo sin foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

En la Tabla 4.2 se muestra el número de nodos y elementos.

Tabla 4.2 Nodos y elementos en Ensayo sin foso de socavación PAB

Nodos	Elementos
1793806	1276746

Elaboración: Propia

4.3.3.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA). En la Figura 4.37 y Figura 4.38 se puede observar el mallado del dominio. Se aprecia una zona más densa en las caras del pilar, porque se necesita desarrollar con mayor precisión los cambios de presión y velocidad producto del choque con el flujo

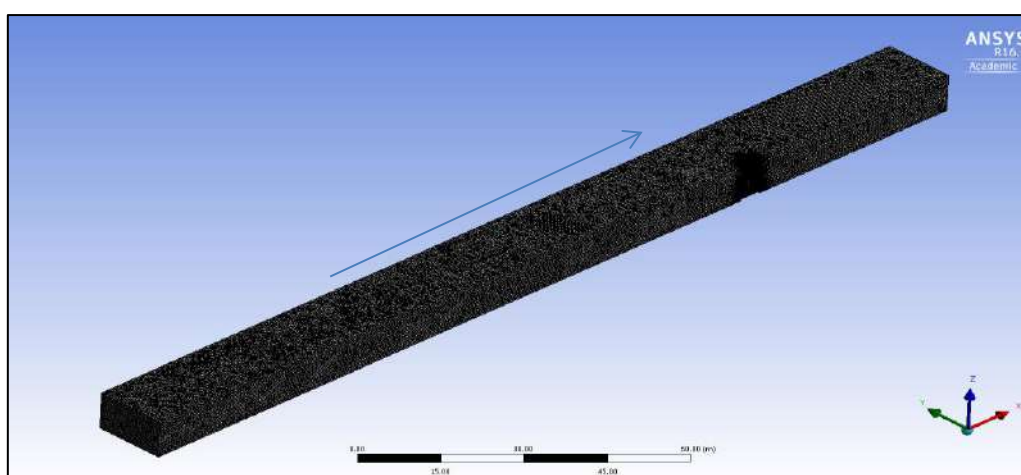


Figura 4.37 Malla PAA. Ensayo sin foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

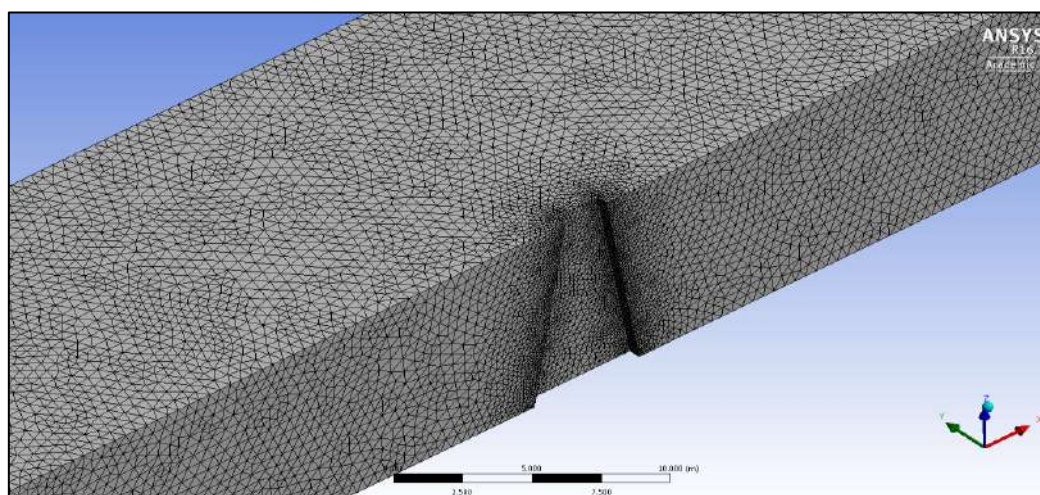


Figura 4.38 Malla PAA. Ensayo sin foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

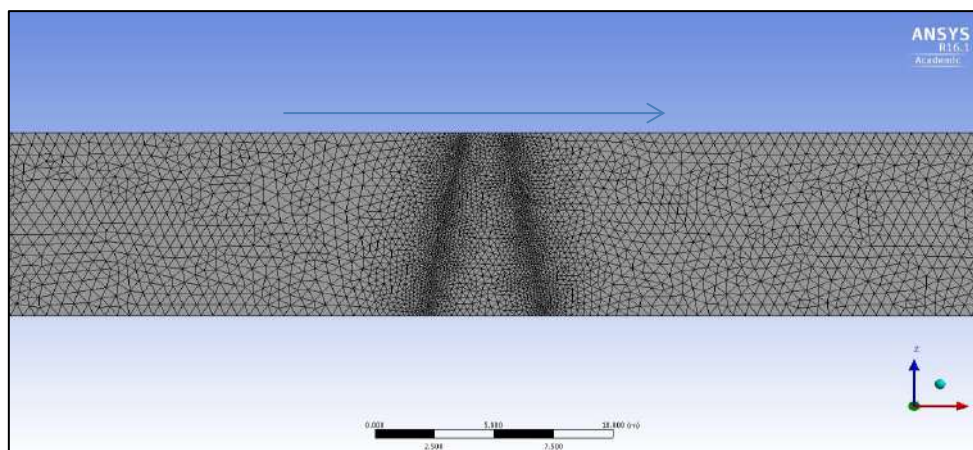


Figura 4.39 Malla PAA. Ensayo sin foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

En la Tabla 4.3 se muestra el número de nodos y elementos.

Tabla 4.3 Nodos y elementos en Ensayo sin foso de socavación PAA

Nodos	Elementos
1768229	1258153

Elaboración: Propia

4.3.4 Física y Configuración del solucionador

Es la última etapa del pre-procesamiento antes de dar solución al modelo. Se seleccionan los modelos físicos que se van a incluir en la simulación. Se especifican las propiedades de los fluidos y las condiciones de frontera. La física y configuración del solucionador es la misma para ambos casos. En la Figura 4.40 se observa el espacio de trabajo para la física del modelo.

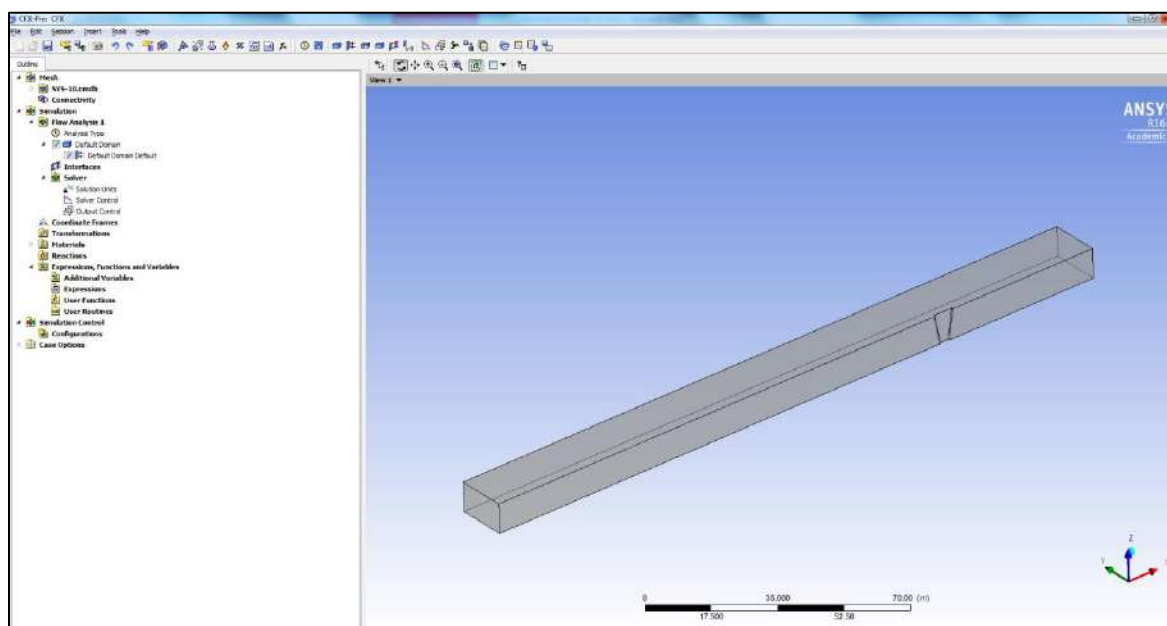


Figura 4.40 Espacio de trabajo CFX-Pre. Ensayo sin foso de socavación

Elaboración: Propia

a) Propiedades de los fluidos

La configuración de las propiedades de los materiales incluidos en la simulación, se realiza en la carpeta *Flow Analysis - Materials*. Las propiedades del agua y aire, se detallan en la Figura 4.41 y Figura 4.42, respectivamente. Estos valores son establecidos de forma predeterminada por el programa; en este caso, no se ha modificado ningún valor. Para el agua y el aire, se especifican los valores de densidad, masa molar, temperatura, etc.

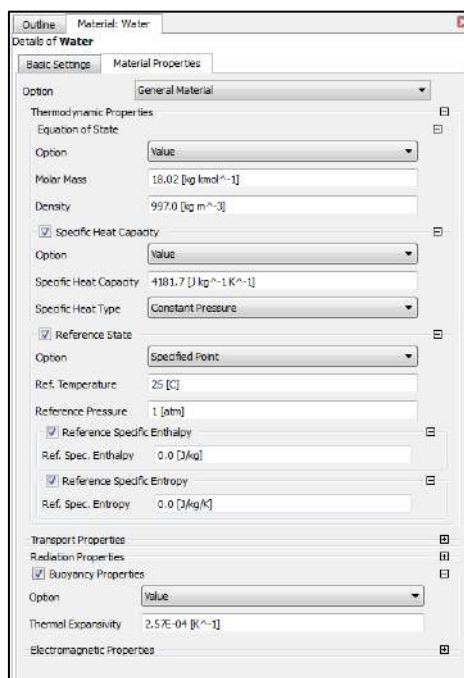


Figura 4.41 Propiedades del agua en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

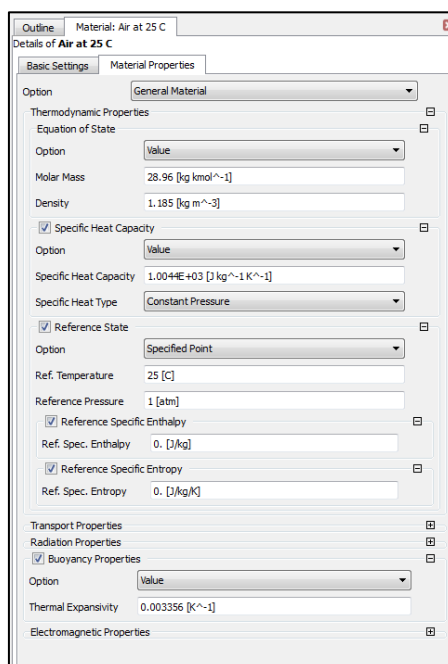


Figura 4.42 Propiedades del aire en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

b) Modelos físicos

Se seleccionan los modelos físicos que se van a incluir en la simulación.

La configuración se realiza en la carpeta *Flow Analysis - Default Domain*. En la Figura 4.43, Figura 4.44, Figura 4.45, Figura 4.46 se muestra la interfaz de configuración. Algunos parámetros son predeterminados por el propio programa, de los cuales se modifican los siguientes (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Parámetros de *Flow Analysis-Default Domain* en Ensayo sin foso de socavación.

Característica	Descripción
Tipo de análisis	<i>Steady State</i>
Materiales	Agua y aire
Presión de referencia	1 atm
Modelo de Flotabilidad	Sí
Fuerza gravitacional	Eje y
Densidad de referencia para flotabilidad	1.2 kg/m ³
Tipo de flujo	Turbulento
Modelo multifase	Homogéneo
Superficie libre	Sí
Tipo de modelo de turbulencia	<i>k-Epsilon</i>
Coeficiente de tensión superficial	0.072 N m ⁻¹
Modelo de tensión superficial	Superficie continua
Flujo primario	Agua
Transferencia en interfaces	Superficie libre

Elaboración: Propia

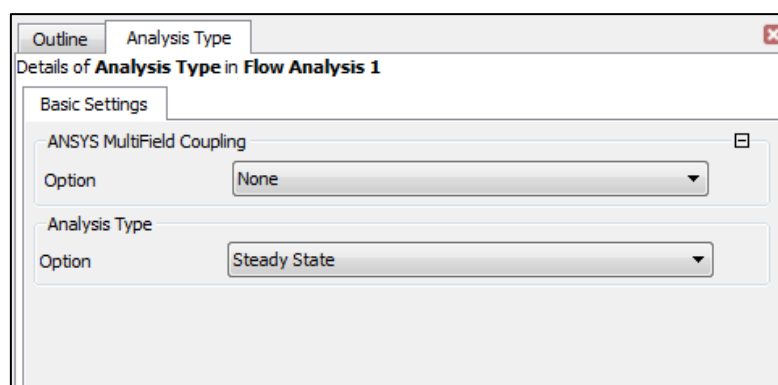


Figura 4.43 Tipo de análisis en Ensayo sin foso de socavación

Elaboración: Propia

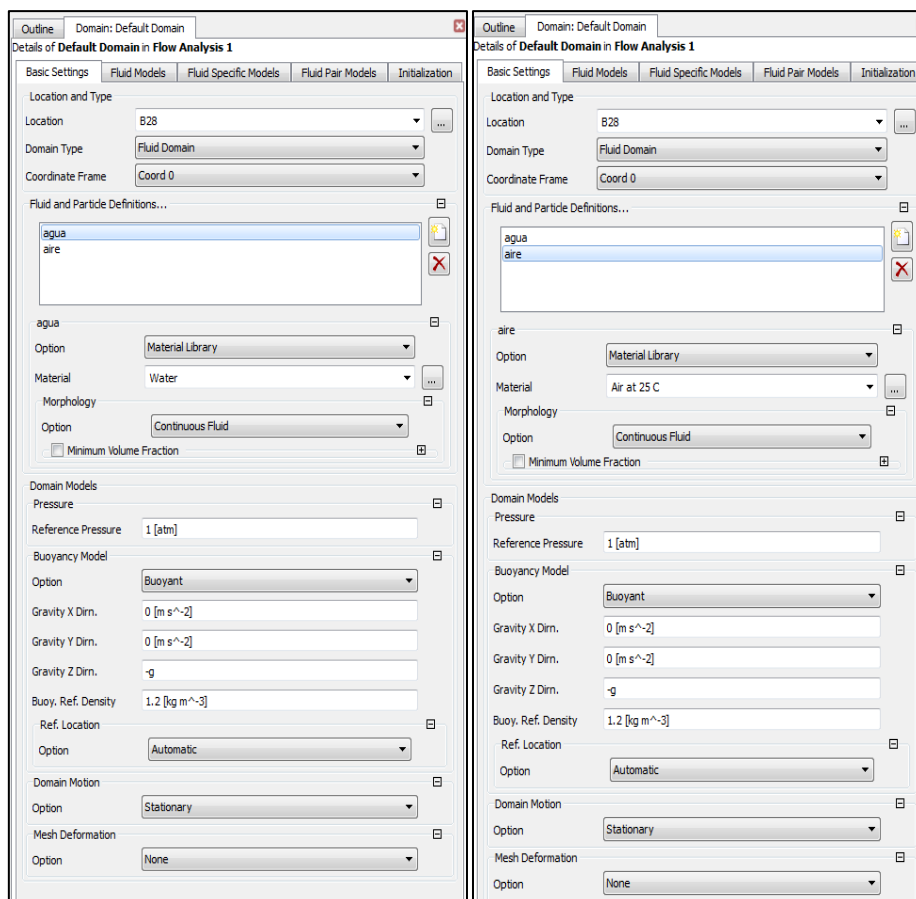


Figura 4.44 Materiales, Presión de referencia, Modelo de flotabilidad en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

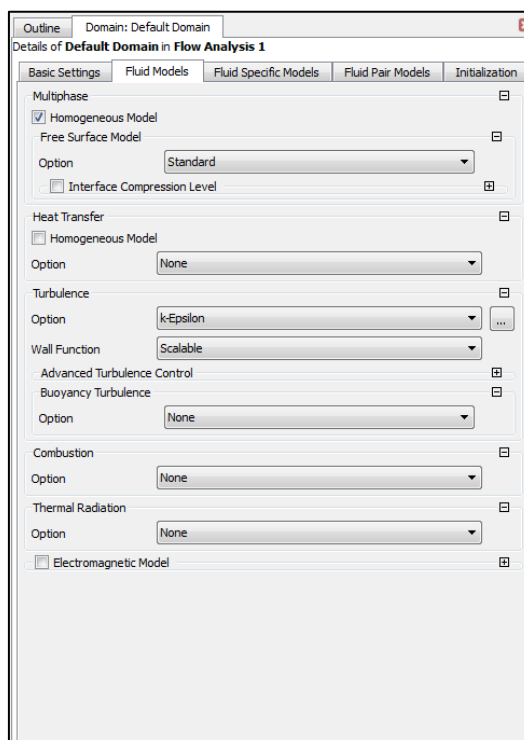


Figura 4.45 Modelo multifase, Modelo de turbulencia en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

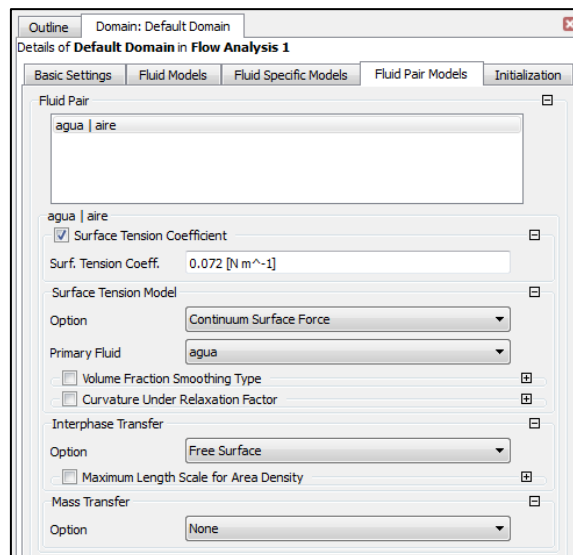


Figura 4.46 Coeficiente de Tensión Superficial, Modelo de tensión superficial, Transferencia de interfaces en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

c) Expresiones

Mediante un conjunto de expresiones se establece:

- *Wdepth*: el tirante de agua aguas arriba y debajo de la estructura, 6m.
- *WaterVF*: La fracción del volumen del dominio para el agua y aire.
- *Backpressure*: la presión de salida, la cual mantiene el tirante de ingreso.

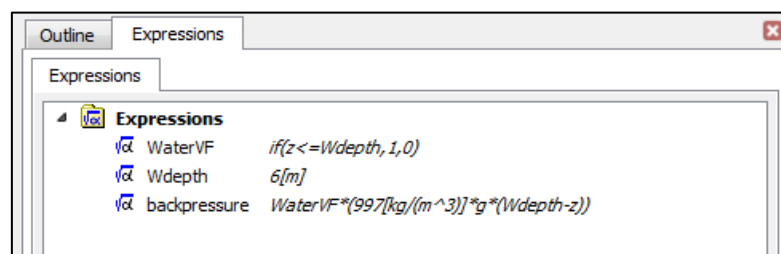


Figura 4.47 Expresiones WaterVF, Wdepth, Backpressure en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

d) Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son un conjunto de propiedades o condiciones en las superficies de los dominios, y se requieren para definir completamente la simulación del flujo. El tipo de condición de frontera que se puede establecer depende de la superficie delimitadora.

Son las condiciones de contorno las que producen diferentes soluciones para una determinada geometría y un conjunto de modelos físicos. Por lo tanto, las condiciones de frontera determinan en gran medida las características de la solución que se obtiene. Es importante establecer condiciones de frontera que reflejen con precisión la situación real para que pueda obtener resultados precisos.

- Inlet

Este tipo de condición se utiliza para definir la velocidad de entrada del flujo de los materiales. La condición se aplica a la superficie de frontera Inlet. El dato de velocidad establecido para el flujo de agua es de 4 m/s, sin embargo, también se aplica automáticamente para el aire. La velocidad ingresa uniforme en ambos casos y cada uno empieza a desarrollar un perfil de velocidad distinto hasta conseguir normalizarse. En el caso del agua, depende de la rugosidad del fondo, geometría, tirante, etc. En la interface o superficie libre, tanto la velocidad como los esfuerzos de corte entre ambos fluidos deben coincidir. Se considera que la velocidad del aire no influye en el desarrollo del perfil de velocidad del agua, debido a que la viscosidad del agua es mucho mayor que la del aire. En la Figura 4.48 Figura 4.49 Figura 4.50, Figura 4.51 se observa la configuración de la condición de frontera *Inlet*.

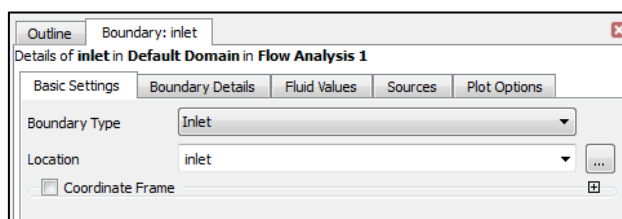


Figura 4.48 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Asignación de la BC *Inlet* a la superficie *Inlet* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

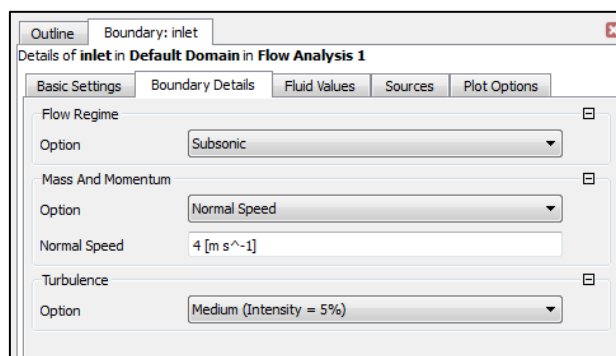


Figura 4.49 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Velocidad de entrada de los materiales en en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

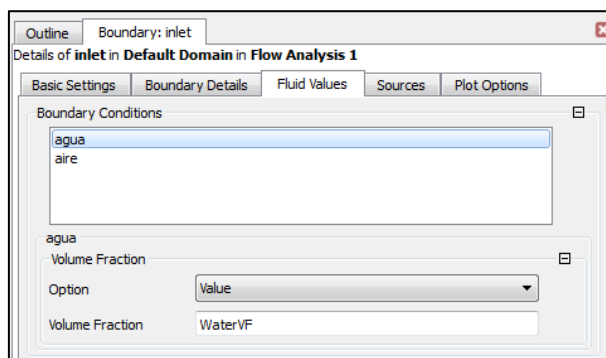


Figura 4.50 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Definición de VF para el agua en en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

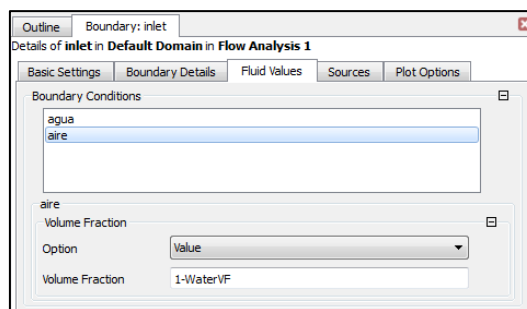


Figura 4.51 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Definición de VF para el aire en en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- *Opening*

Este tipo de condición permite que el fluido cruce la superficie límite en cualquier dirección. Por ejemplo, todo el fluido podría fluir hacia el dominio en la abertura, o todo el fluido podría fluir fuera del dominio, o una mezcla de los dos podría ocurrir. Se puede especificar con un valor de presión relativa.

La condición se aplica para las superficies de frontera Outlet y Top. En la superficie de frontera *outlet* se asigna el valor de presión relativa definida por la expresión *backpressure*, que permite el ingreso y salida de agua y aire. En la Figura 4.52, Figura 4.53, Figura 4.54 y Figura 4.55 se observa la configuración para la condición *Opening* en la superficie outlet. En la superficie de frontera Top asigna el valor de presión relativa 0 Pa, que permite el ingreso y salida de aire. En la Figura 4.56, Figura 4.57, Figura 4.58 y Figura 4.59 se observa la configuración para la condición *Opening* en la superficie Top.

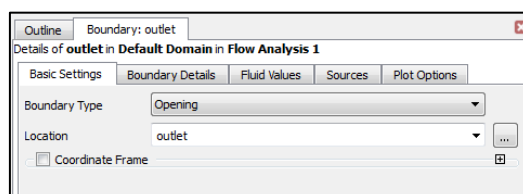


Figura 4.52 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Asignación de la BC *opening* a la superficie *Outlet* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboación: Propia

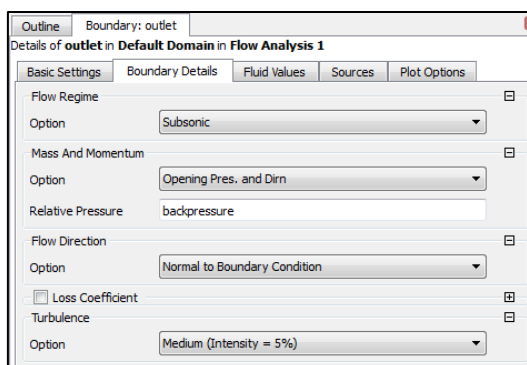


Figura 4.53 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Presión relativa. Superficie *Outlet* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

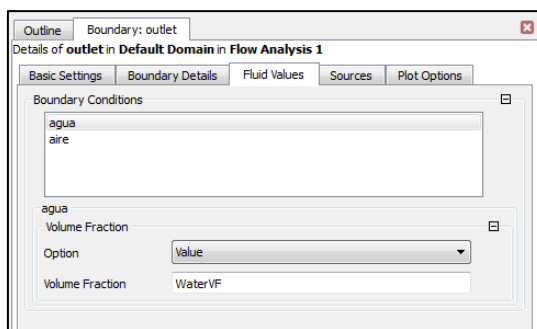


Figura 4.54 Cuadro de diálogo de la BC opening. Definición de VF para el agua. Superficie Outlet en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

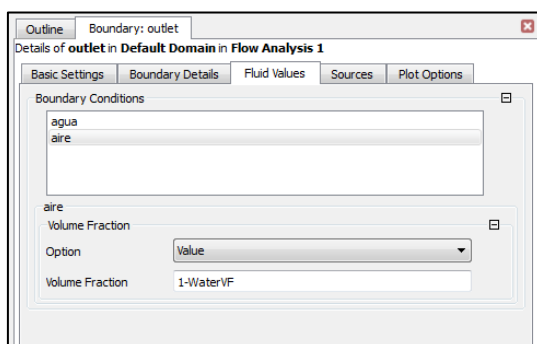


Figura 4.55 Cuadro de diálogo de la BC opening. Definición de VF para el aire. Superficie Outlet en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

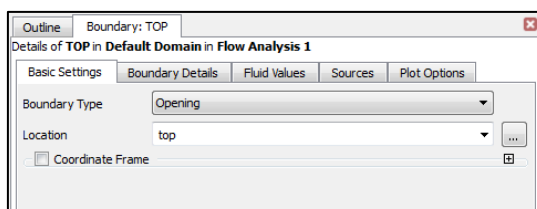


Figura 4.56 Cuadro de diálogo de la BC opening. Asignación de la BC opening a la superficie Top en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

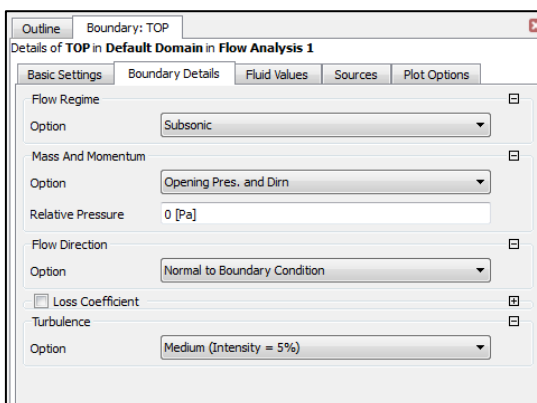


Figura 4.57 Cuadro de diálogo de la BC opening. Presión relativa. Superficie Top en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

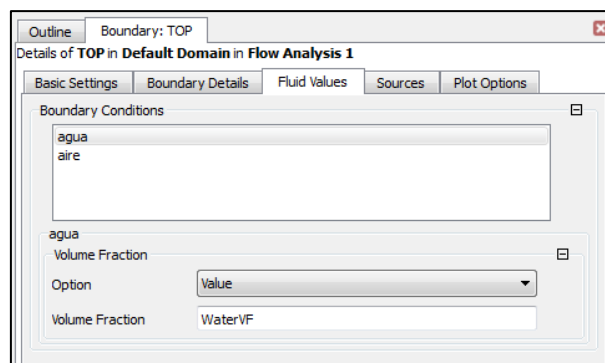


Figura 4.58 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Definición de VF para el agua.
Superficie Top en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

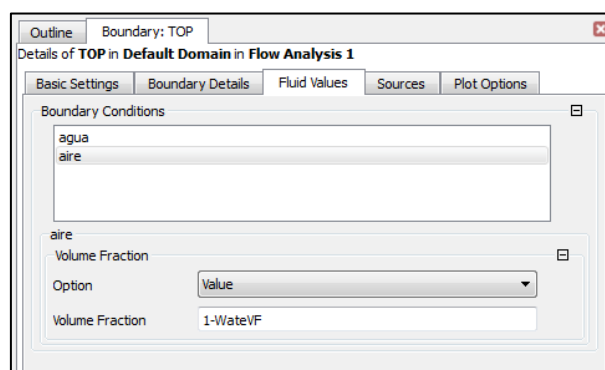


Figura 4.59 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Definición de VF para el aire. Superficie
Top en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Wall

Este tipo de condición permite simular una pared sólida a los límites del flujo del fluido. La condición se aplica para las superficies de frontera Bed y Pilar.

Dentro de la configuración, en ambos se ha elegido la opción *No slip Wall*, porque es el tipo más común de implementación de la condición *Wall*.

El fluido inmediatamente al lado de la pared asume la velocidad de la pared, que es cero por defecto.

Para simulaciones utilizando modelos de turbulencia, se puede describir la superficie de la pared como lisa (*Smooth*) o áspera (*Rough*).

En ambas superficies, se asignó la pared como lisa. Para las paredes rugosas, se requiere la rugosidad equivalente del grano de arena como parámetro de entrada.

En la Figura 4.60 y Figura 4.61 se observa la configuración para la condición *Wall* en la superficie Bed. Así mismo, en la Figura 4.62 y Figura 4.63 se observa la configuración para la condición *Wall* en la superficie Pilar.

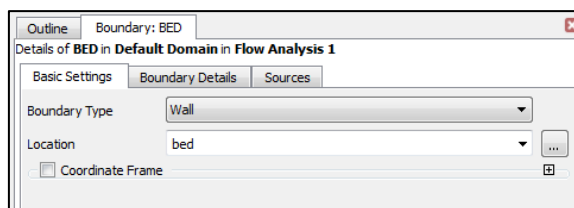


Figura 4.60 Cuadro de diálogo de la BC wall. Asignación de la BC wall a la superficie *Bed* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

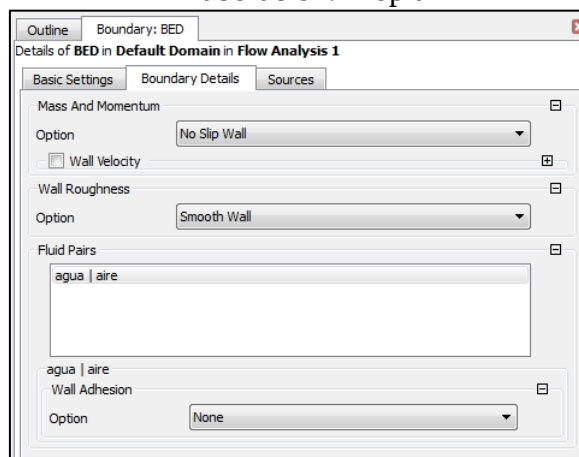


Figura 4.61 Cuadro de diálogo de la BC wall. *No Slip Wall*, *Smooth Wall*. Superficie *Bed* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

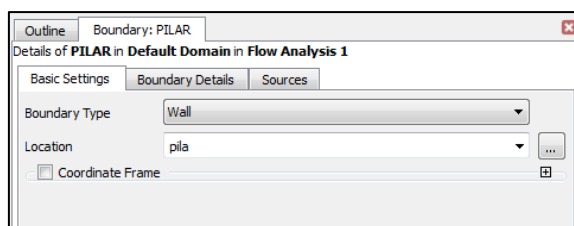


Figura 4.62 Cuadro de diálogo de la BC wall. Asignación de la BC wall a la superficie *Pilar* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

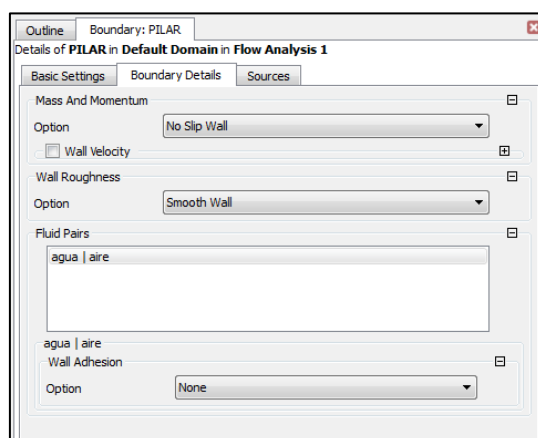


Figura 4.63 Cuadro de diálogo de la BC wall. *No Slip Wall*, *Smooth Wall*. Superficie *Pilar* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry

Este tipo de condición tiene la propiedad de que todos los aspectos del flujo son simétricos sobre algún plano físico (plano).

Un problema es simétrico respecto a un plano cuando el flujo en un lado del plano es una imagen similar de flujo en el lado opuesto.

Un caso particular puede tener más de un plano de simetría. La condición se aplica para las superficies de frontera Symmetry 1 y Symmetry 2. En ambos, asume que el campo de flujo es simétrico.

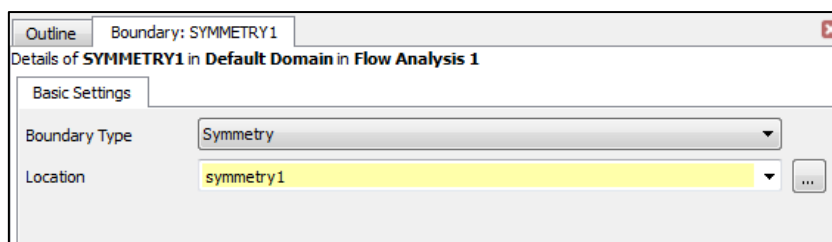


Figura 4.64 Cuadro de diálogo de la BC *symmetry*. Asignación de la BC *symmetry* a la superficie *symmetry1* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

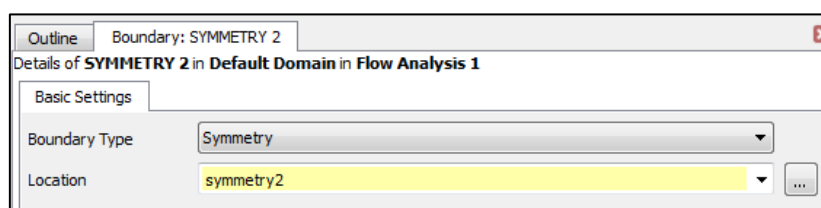


Figura 4.65 Cuadro de diálogo de la BC *symmetry*. Asignación de la BC *symmetry* a la superficie *symmetry2* en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

En la Tabla 4.5 se presenta de forma resumida las condiciones de frontera para el ensayo sin foso de socavación.

Tabla 4.5 Tabla resumida de las condiciones de frontera para el ensayo sin foso de socavación

Superficie de frontera	Condición de frontera	Detalle de Frontera	Valor de fracción de Fluido
Inlet	Inlet	$V = 4 \text{ m/s}$	Agua: WaterVF Aire: 1- WaterVF
Outlet	Opening	backpressure	Agua: WaterVF Aire: 1- WaterVF
Top	Opening	Relative pressure = 0	Agua: WaterVF Aire: 1- WaterVF
Pila	Wall	No slip Wall	-
Bed	Wall	No slip Wall	-
Symmetry 1	Symmetry	-	-
Symmetry 2	Symmetry	-	-

Elaboración: Propia

e) Unidades

En la Figura 4.66 se muestran las Unidades trabajadas en el modelo.

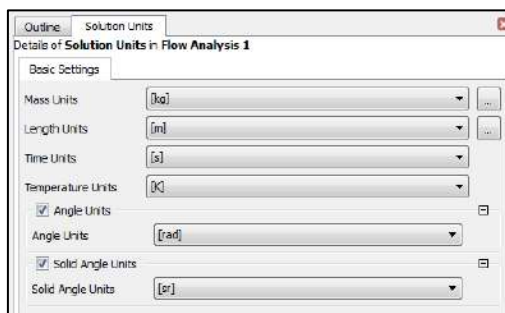


Figura 4.66 Unidades en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

f) Control de la Solución

En la Figura 4.67, Figura 4.68 y Figura 4.69 se muestra la configuración del control del Solver. Se ingresa el número de iteraciones necesario para que la solución converja.

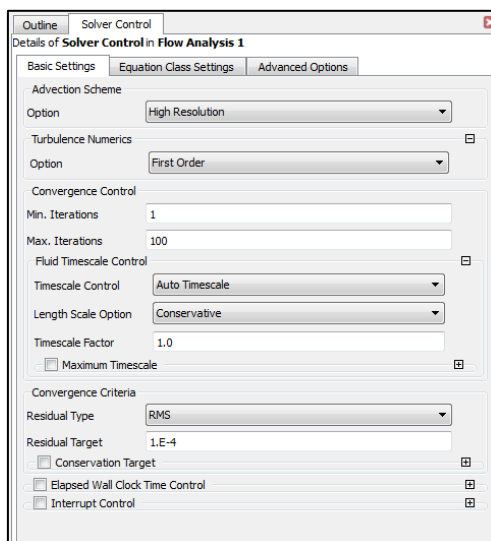


Figura 4.67 Interfaz control de la solución. Configuración básica en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

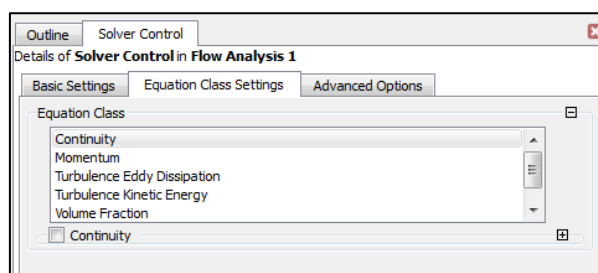


Figura 4.68 Interfaz control de la solución. Configuración de ecuaciones en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

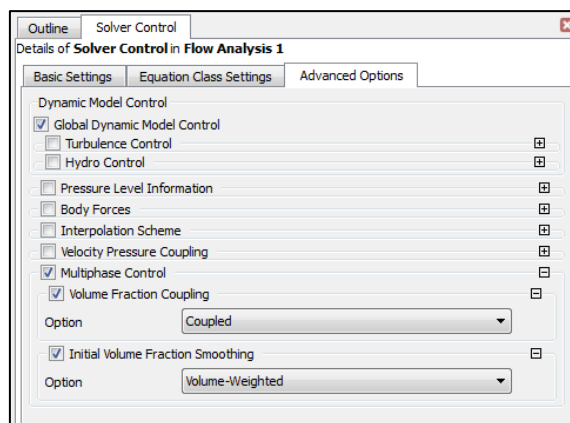


Figura 4.69 Interfaz control de la solución. Opciones avanzadas en Ensayo sin foso de socavación

Elaboración: Propia

En la Tabla 4.6 se presenta de forma general los mecanismos para el control de la solución.

Tabla 4.6 Control de la solución

Contro de la solución	Máximo 100 iteraciones
Criterio de convergencia	10^{-4}
Fracción de volumen inicial	Volumen - Weighted

Elaboración: Propia

4.3.4.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). En la Figura 4.70 se muestra la representación final de la física y configuración del solucionador. Los colores: negro, azul y rojo, representan la condición de frontera: *Inlet*, *Opening* y *Symmetry*, respectivamente.

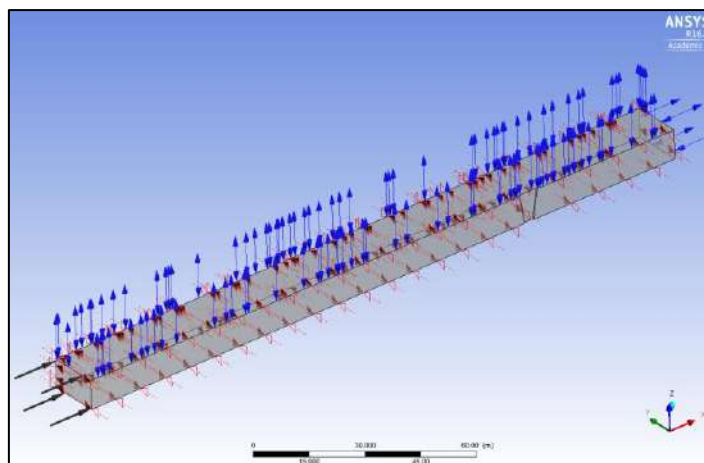


Figura 4.70 PAB sin foso de socavación

Elaboración: Propia

4.3.4.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA). En la Figura 4.71 se muestra la interfaz gráfica de la física y configuración del solucionador.

Los colores: negro, azul y rojo, representan la condición de frontera: *Inlet*, *Opening* y *Symmetry*, respectivamente

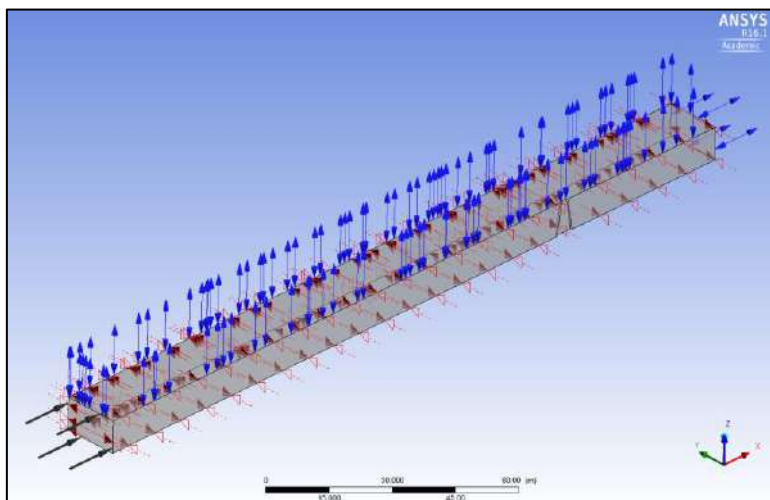


Figura 4.71 PAA sin foso de socavación

Elaboración: Propia

4.4 Ensayo con foso de socavación

Se considera que el fondo del cauce presenta profundización alrededor del pilar. Además, las líneas de corriente son perpendiculares al ancho del pilar.

4.4.1 Geometría

Utilizando la herramienta Design Modeler, generador CAD de Ansys, podemos realizar la geometría del dominio donde se desarrollará el flujo de agua y aire.

4.4.1.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). Las medidas del pilar son:

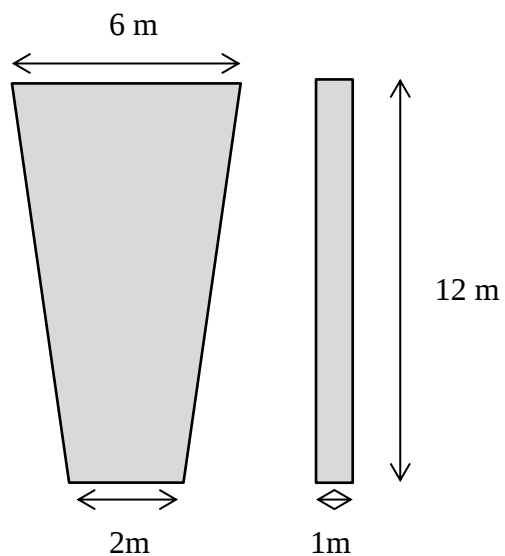


Figura 4.72 Vista del perfil (izquierda) y frontal (derecha) del PAB

Elaboración: Propia

Se procede a construir un volumen o dominio dentro del cual se desarrollarán las ecuaciones de transporte del agua y del aire. En la 4.73, se muestra el dominio de color azul y plomo.

También, se puede visualizar un volumen vacío dentro del bloque (Figura 4.74), este representa al pilar PAB; al ser un volumen sólido no forma parte de la solución, por ello, se extrae del volumen general

Además, en este caso se ha representado el dominio dentro de la profundización o erosión alrededor del pilar, por ello, se observa una superficie profunda en la parte baja del pilar (Figura 4.75)

La dimensiones del dominio, como lo son: longitud aguas arriba del pilar, longitud aguas abajo del pilar y lados del pilar, son apropiadas para que se pueda desarrollar el flujo.

Por último, la altura del dominio es determinada a partir de la altura del pilar. Las dimensiones se muestran en el Anexo E.

La profundidad del foso se asume de 3 m y el ángulo de reposo de 45° .

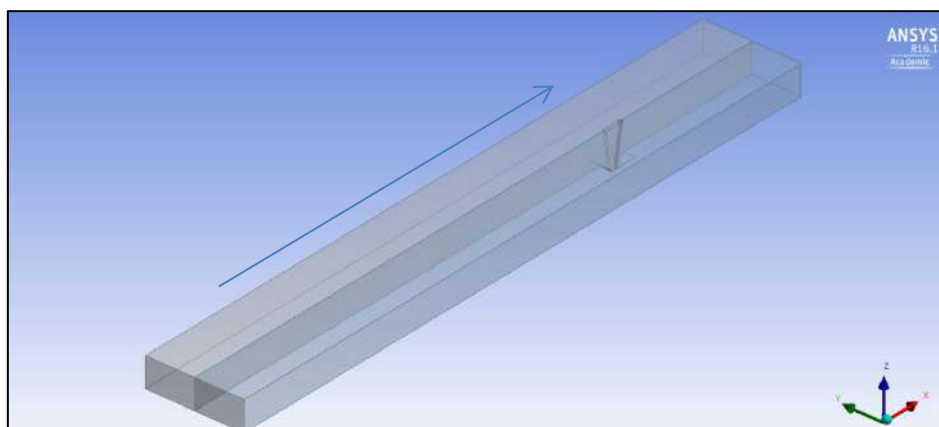


Figura 4.73 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia



Figura 4.74 Vista en elevación del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

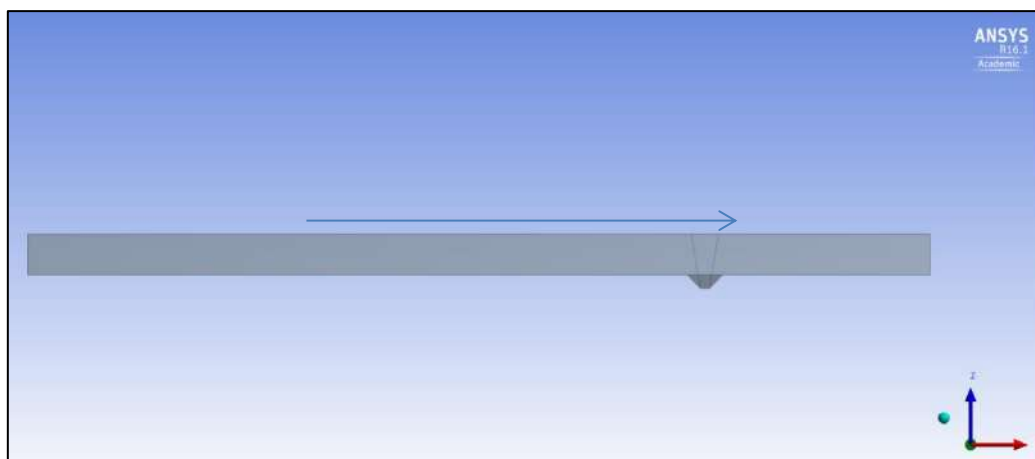


Figura 4.75 Vista lateral del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAB en
Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

La Geometría inicial del dominio en el foso de socavación se muestra en la Figura 4.76, Figura 4.77, Figura 4.78 y Figura 4.79.

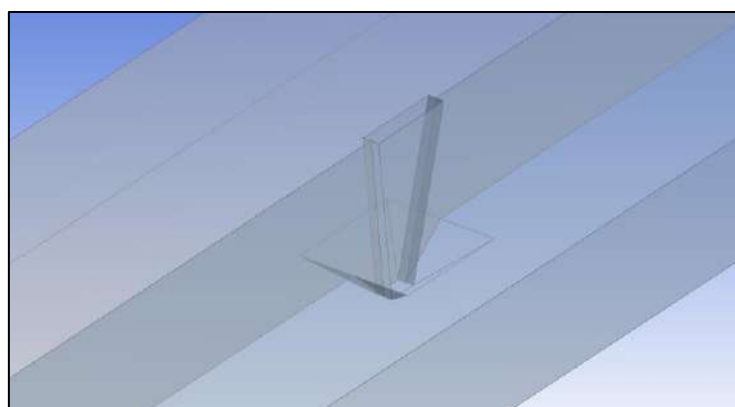


Figura 4.76 Isométrico del dominio en el foso de socavación. PAB en Ensayo con foso de
socavación
Elaboración: Propia

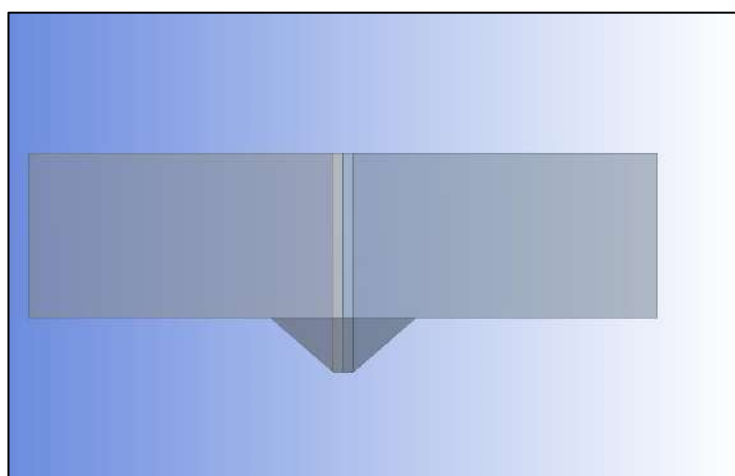


Figura 4.77 Vista frontal del dominio en el foso de socavación. PAB en Ensayo con foso
de socavación
Elaboración: Propia

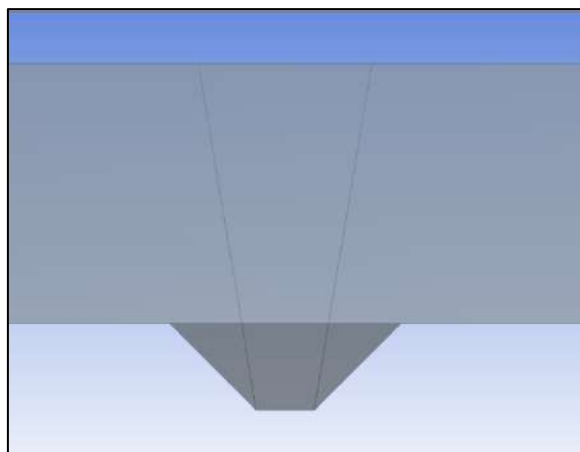


Figura 4.78 Vista lateral del dominio en el foso de socavación. PAB en Esanyo con foso de socavación

Elaboración: Propia

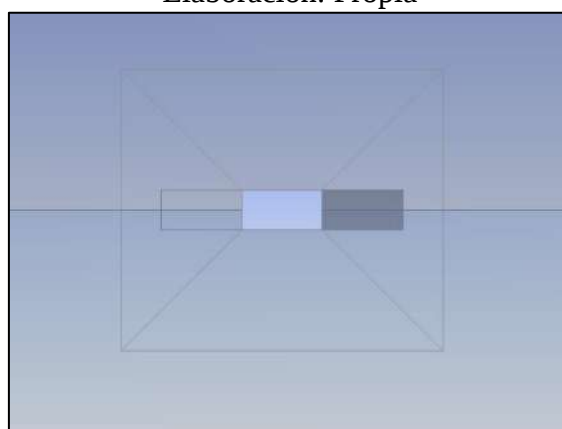


Figura 4.79 Vista en elevación del dominio en el foso de socavación. PAB en Esanyo con foso de socavación

Elaboración: Propia

Todo modelo numérico mientras más simplificado nos ahorrará tiempo de simulación y costo. El dominio al ser simétrico en ambos lados del pilar, se considera, presentará similares resultados a cada lado. Entonces, el dominio se simplifica y solo se considera para la simulación el bloque de color plomo. Lo anterior, se puede observar en la Figura 4.80.

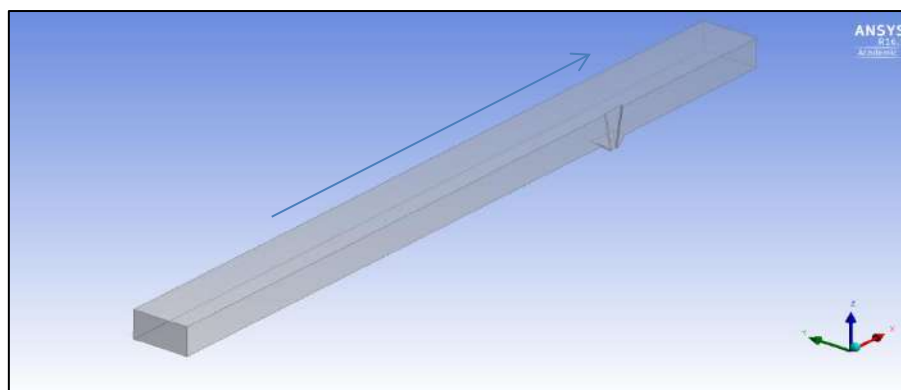


Figura 4.80 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAB en Esanyo con foso de socavación

Elaboración: Propia

El dominio en el foso de socavación se observa en la Figura 4.81, Figura 4.82, Figura 4.83 y Figura 4.84.

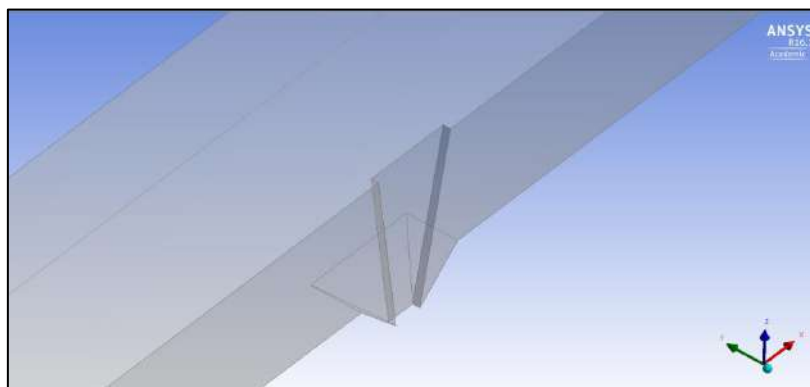


Figura 4.81 Isométrico del dominio en el foso de socavación. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

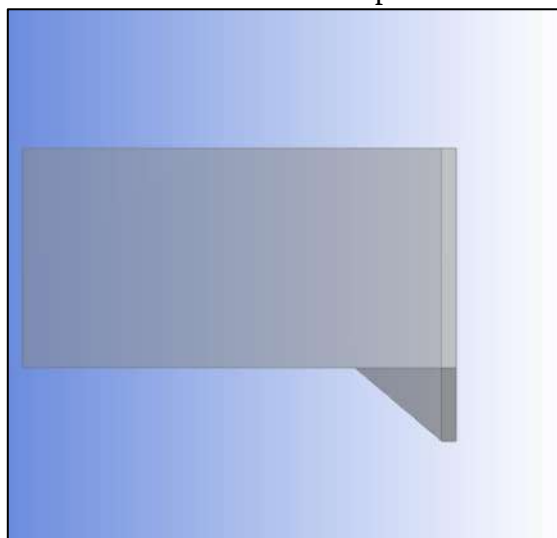


Figura 4.82 Vista frontal del dominio en el foso de socavación. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

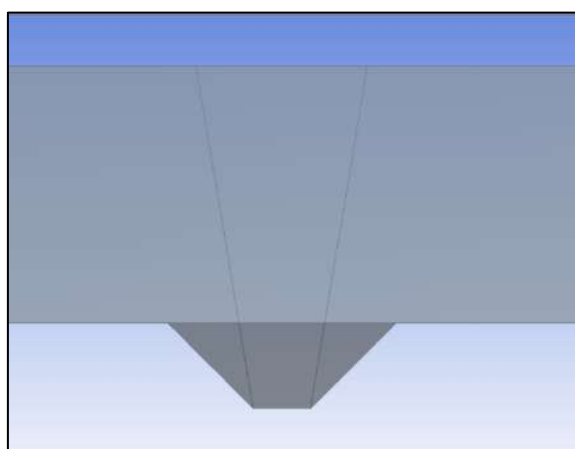


Figura 4.83 Vista lateral del dominio en el foso de socavación. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

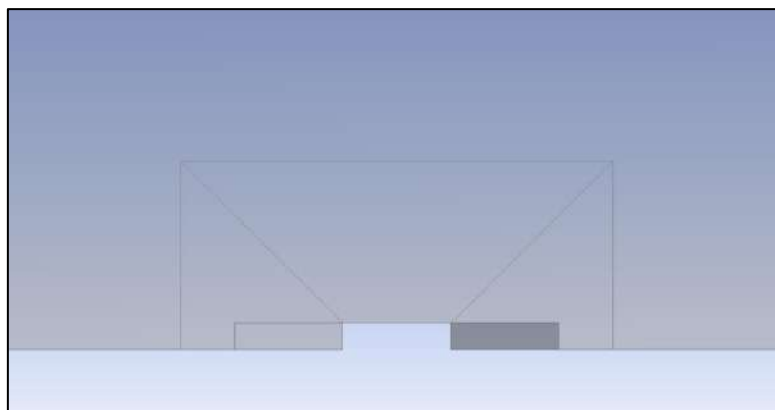


Figura 4.84 Vista en elevación del dominio en el foso de socavación. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

4.4.1.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA). Las medidas del pilar son:

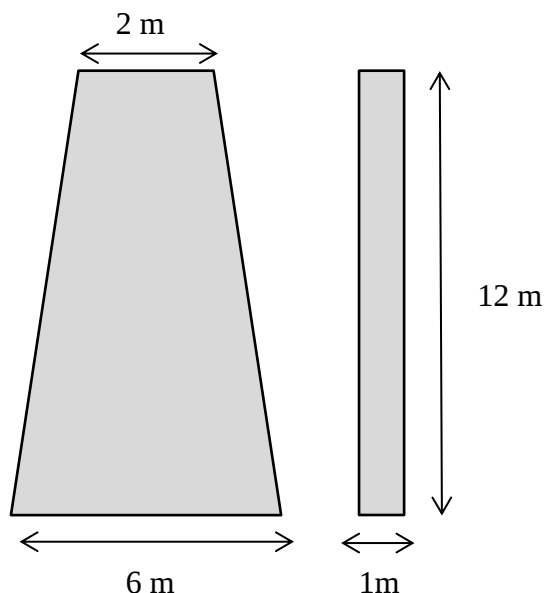


Figura 4.85 Vista del perfil (izquierda) y ancho (derecha) del PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Se procede a construir un volumen o dominio dentro del cual se desarrollarán las ecuaciones de transporte del agua y del aire. En la 4.86, se muestra el dominio de color azul y plomo. También, se puede visualizar un volumen vacío dentro del bloque (Figura 4.87), este representa al pilar PAA; al ser un volumen sólido no forma parte de la solución, por ello, se extrae del volumen general. Además, en este caso se ha representado el dominio dentro de la profundización o erosión alrededor del pilar, por ello, se observa una superficie profunda en la parte baja del pilar (Figura 4.88)

Las dimensiones del dominio, como lo son: longitud aguas arriba del pilar, longitud aguas abajo del pilar y lados del pilar, son apropiadas para que se pueda desarrollar el flujo.

Por último, la altura del dominio es determinada a partir de la altura del pilar. Las dimensiones se muestran en el Anexo F.

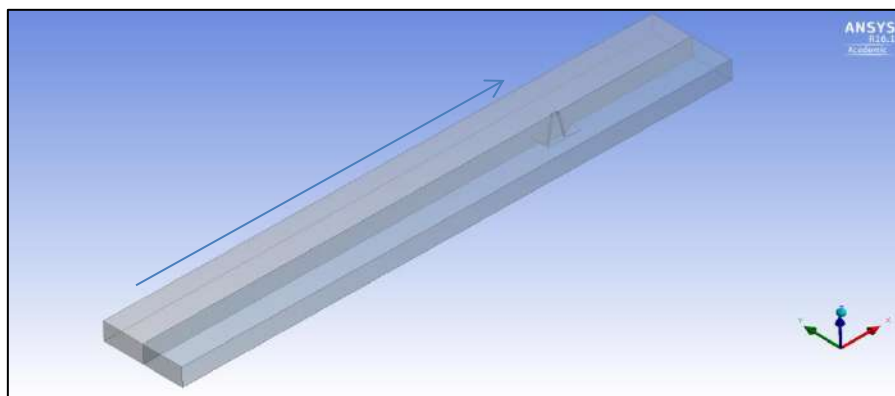


Figura 4.86 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAA en
Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia



Figura 4.87 Vista en elevación, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAA en
Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

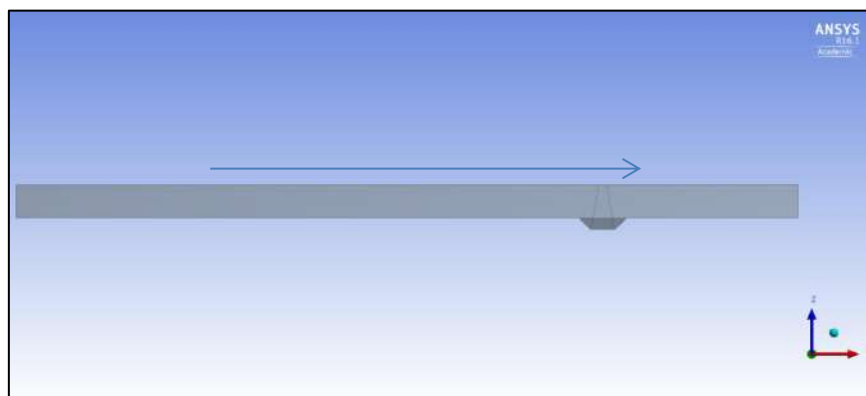


Figura 4.88 Vista lateral, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAA en Ensayo con
foso de socavación
Elaboración: Propia

La Geometría inicial del dominio del foso de socavación se muestra en las Figura 4.89, Figura 4.90, Figura 4.91 y Figura 4.92.

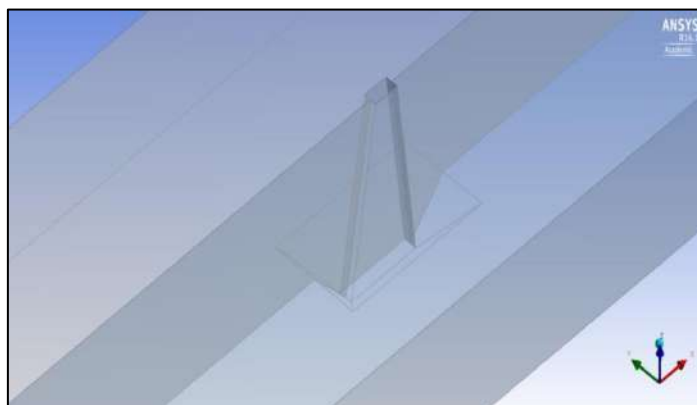


Figura 4.89 Isométrico del dominio en el foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

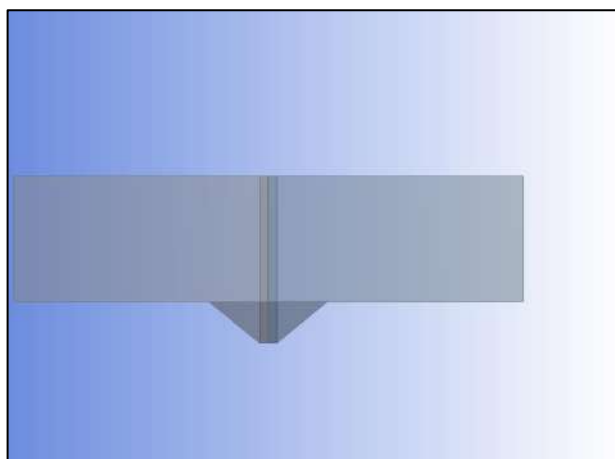


Figura 4.90 Vista frontal del dominio en el foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

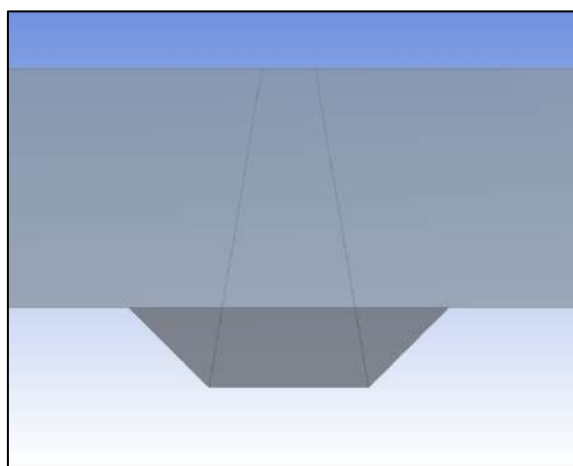


Figura 4.91 Vista lateral del dominio en el foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

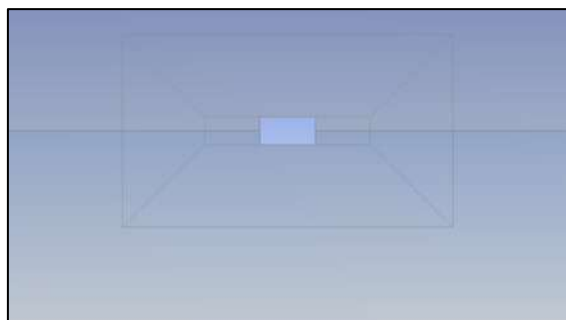


Figura 4.92 Vista en elevación del dominio en el foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

Todo modelo numérico mientras más simplificado nos ahorrará tiempo de simulación y costo. El dominio al ser simétrico en ambos lados del pilar, se considera, presentará similares resultados a cada lado. Entonces, el dominio se simplifica y solo se considera para la simulación el bloque de color plomo. Lo anterior, se puede observar en la Figura 4.93.

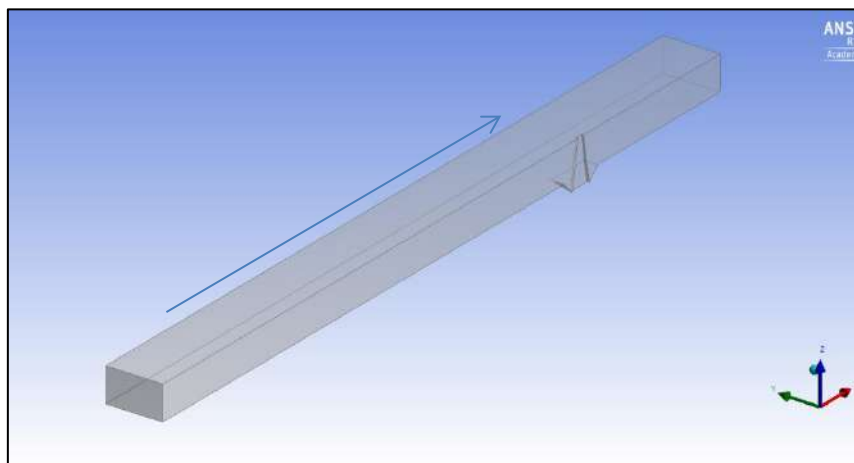


Figura 4.93 Isométrico del dominio, el flujo se produce en la dirección del eje X. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

El dominio en el foso de socavación se observa en la Figura 4.94, Figura 4.95, Figura 4.96 y Figura 4.97.

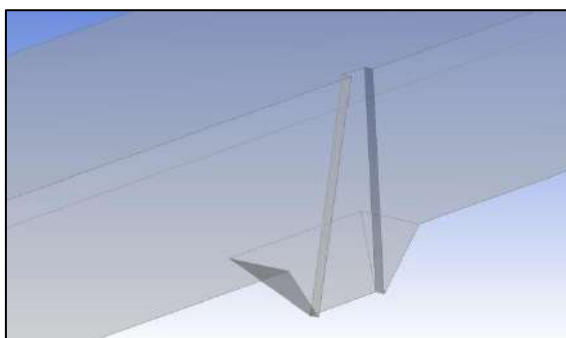


Figura 4.94 Isométrico del dominio del foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

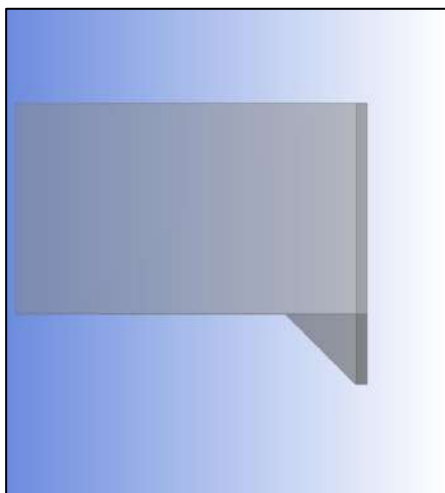


Figura 4.95 Vista frontal del dominio en el foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

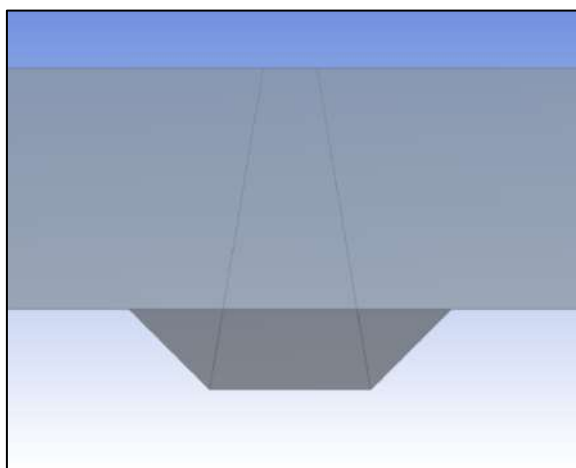


Figura 4.96 Vista lateral del dominio en el foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

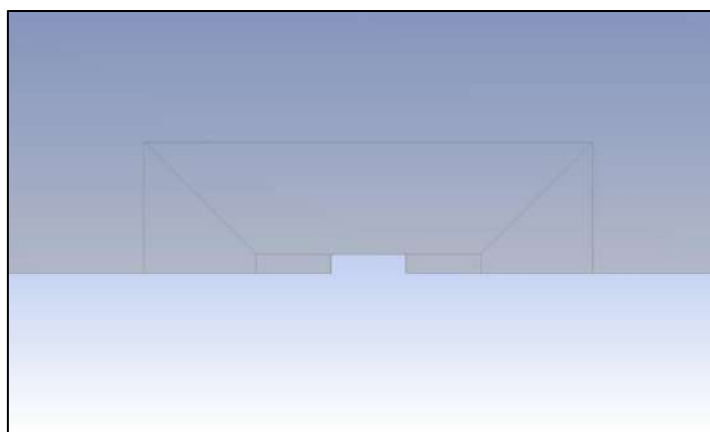


Figura 4.97 Vista en elevación del dominio en el foso de socavación. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

4.4.2 Superficies de frontera

Definida la geometría del dominio, se procede a dar nombre a todas las superficies de frontera y después, en la fase de física y configuración del solucionador, se les aplicará las condiciones de borde o valores de borde.

4.4.2.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). Cada superficie de frontera se selecciona de color verde y se define con un nombre;

- Bed: cauce rígido.

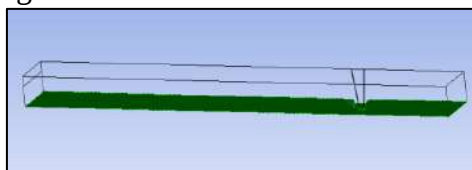


Figura 4.98 Superficie de frontera bed.PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Inlet: ingreso de los flujos.

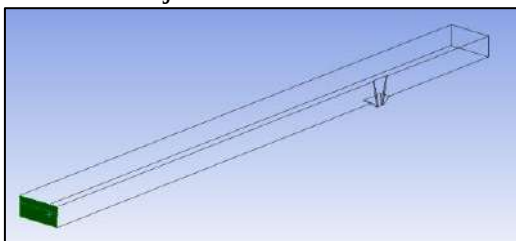


Figura 4.99 Superficie de frontera inlet PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Outlet: salida de los flujos.

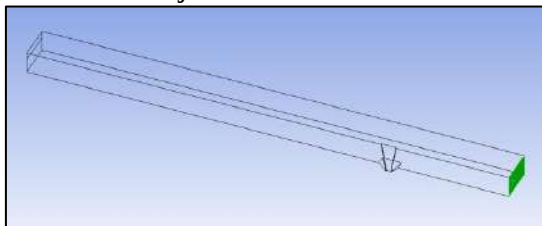


Figura 4.100 Superficie de frontera outlet PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Pilar: superficie de la estructura.

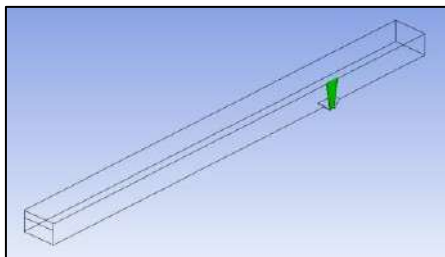


Figura 4.101 Superficie de frontera pilar PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Top: entrada de aire.

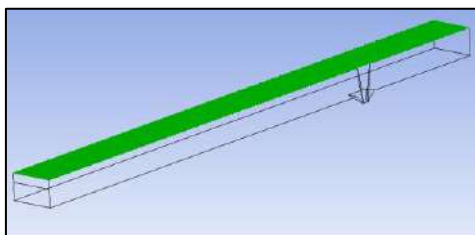


Figura 4.102 Superficie de frontera top PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 1: plano de simetría.

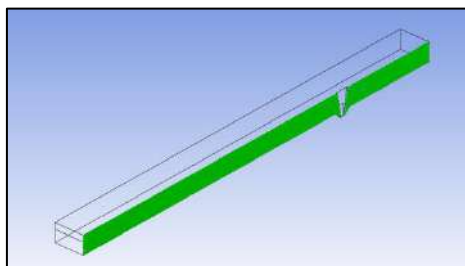


Figura 4.103 Superficie de frontera symmetry1. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 2: plano de simetría

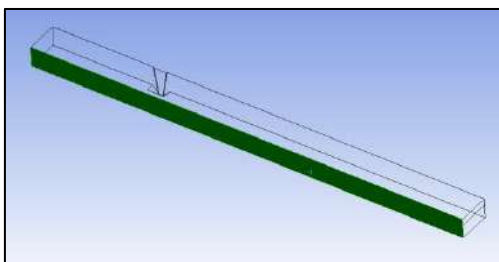


Figura 4.104 Superficie de frontera symmetry2 PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

4.4.2.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA). Cada superficie de frontera se selecciona de color verde y se define con un nombre;

- Bed: cauce rígido.

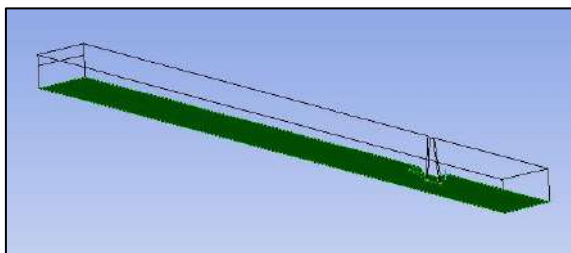


Figura 4.105 Superficie de frontera bed.PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Inlet: ingreso de los flujos.

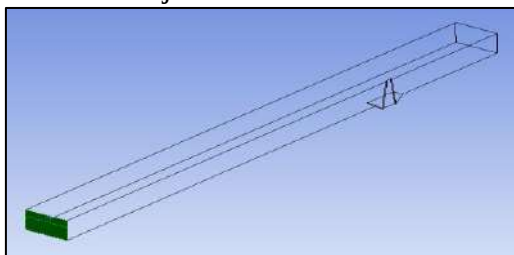


Figura 4.106 Superficie de frontera inlet PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Outlet: salida de los flujos.

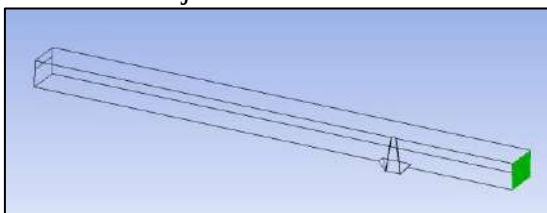


Figura 4.107 Superficie de frontera outlet PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Pilar: superficie de la estructura.

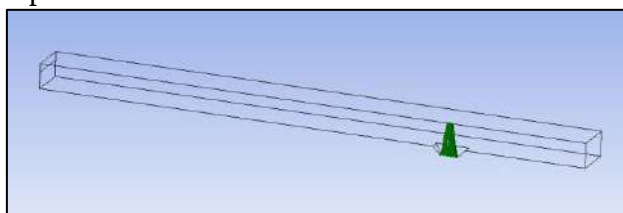


Figura 4.108 Superficie de frontera pilar PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Top: entrada de aire.

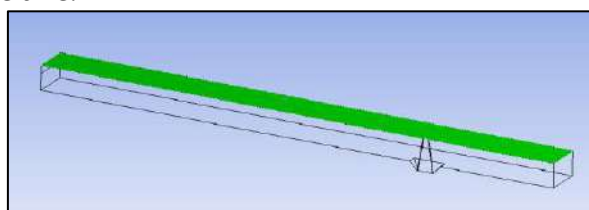


Figura 4.109 Superficie de frontera top PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 1: plano de simetría.

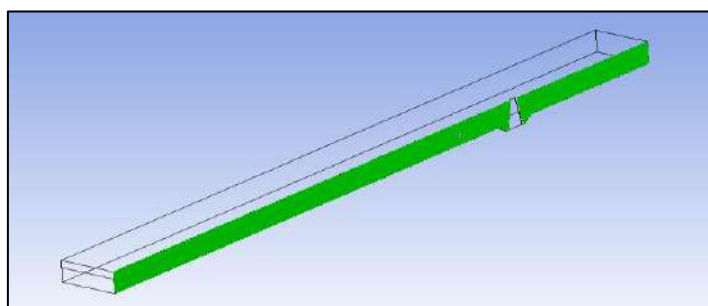


Figura 4.110 Superficie de frontera symmetry1. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Symmetry 2: plano de simetría

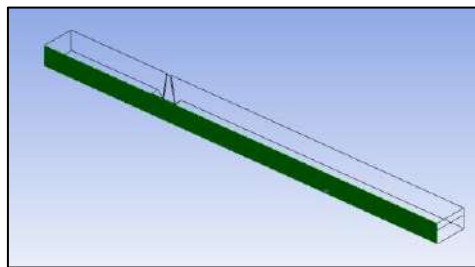


Figura 4.111 Superficie de frontera symmetry2. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

4.4.3 Mallado

La herramienta ANSYS-MESH es el componente de ANSYS CFX utilizado para crear el mallado del dominio. Se utiliza un mallado no muy fino, con el fin de realizar simulaciones en periodos cortos de tiempo. Además como se trata de una geometría sencilla, no es necesario tener una gran cantidad de elementos para poder observar el fenómeno en estudio.

En la Figura 4.112 se muestra el espacio de trabajo de ANSYS-MESH.

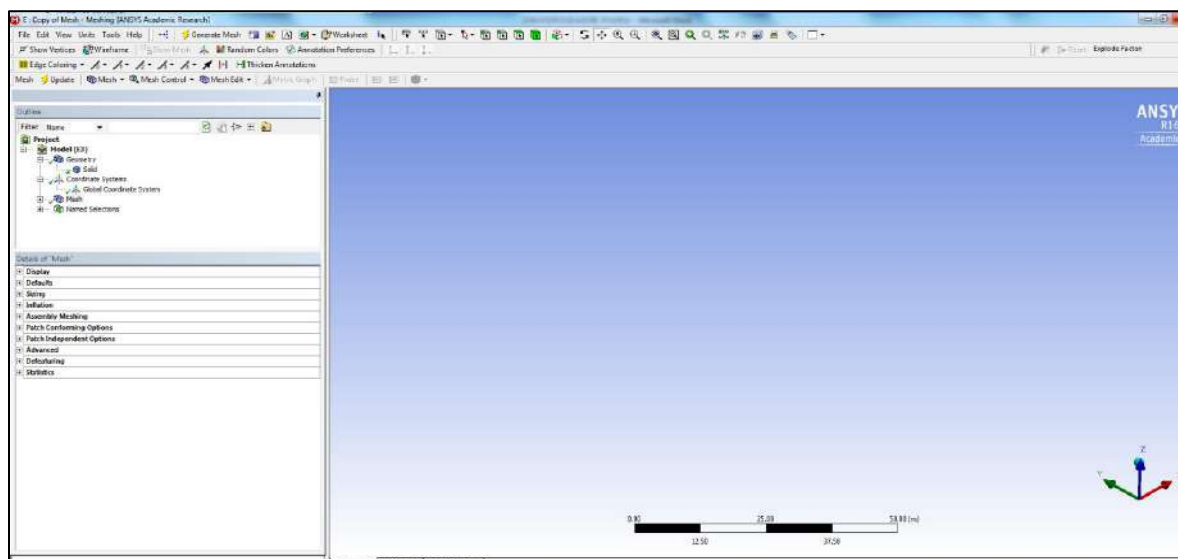


Figura 4.112 Espacio de trabajo Ansys Mesh
Elaboración: Propia

En ambos casos, la configuración de los detalles de la malla se realiza en la carpeta *Mesh*; cuyos parámetros son mostrados en la Figura 4.113. Algo importante de indicar es que éstos son parámetros generales, que pueden ser modificados en ciertas partes de la malla para mejorar su calidad, en donde sea necesario. Algunos parámetros que pueden modificarse se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Parámetro de mallado para Ensayo con foso de socavación.

Característica	Descripción
Solver Preference	CFX

Tabla 4.7 Parámetro de mallado para Ensayo con foso de socavación (continuación)

Característica	Descripción
Relevance	100
Advanced Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Smoothing	High
Transition	Slow
Max Face Size	0.50 m

Elaboración: Propia

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
☐ Relevance	100
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
☐ Curvature Normal Angle	Default (12.0 °)
☐ Num Cells Across Gap	Default (5)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
☐ Min Size	Default (2.0076e-002 m)
☐ Proximity Min Size	Default (2.0076e-002 m)
☐ Max Face Size	0.50 m
☐ Max Size	Default (4.01530 m)
☐ Growth Rate	Default (1.10)
Minimum Edge Length	0.50 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
☐ Transition Ratio	0.77
☐ Maximum Layers	5
☐ Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	

Figura 4.113 Interfaz de parámetros Mesh para Ensayo con foso de socavación

Elaboración: Propia

En la Figura 4.114 se puede visualizar la diferencia de valores entre *coarse* y *fine* y además el nivel de *Relevance*.

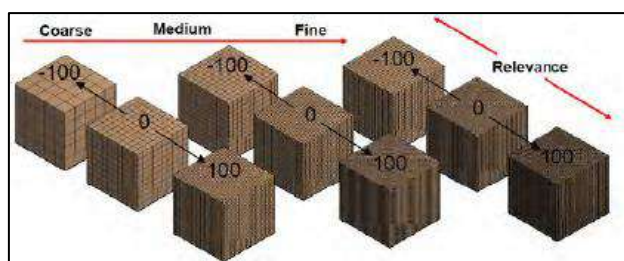


Figura 4.114 Refinado de mallado

Fuente:

4.4.3.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). En la Figura 4.115 y Figura 4.116 se puede observar el mallado del dominio. Se aprecia una zona más

densa en las caras del pilar y en el foso de socavación, porque se necesita desarrollar con mayor precisión los cambios de presión y velocidad producto del choque con el flujo.

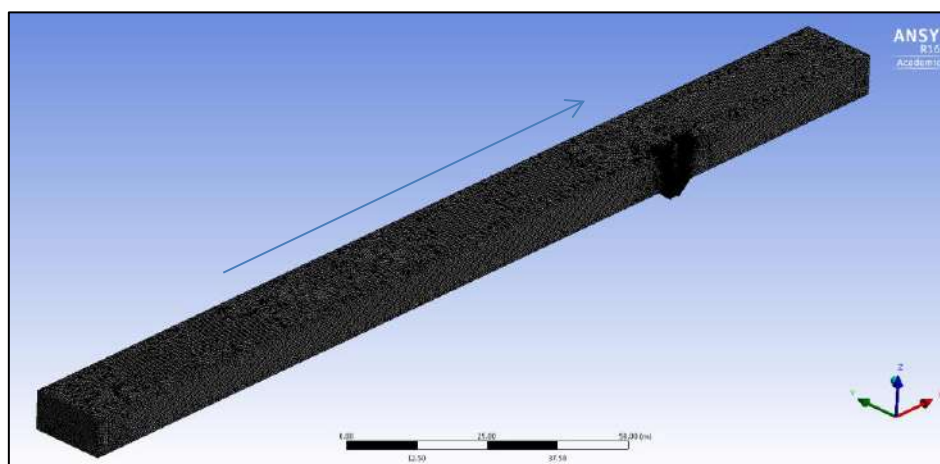


Figura 4.115 Malla PAB. Ensayo con foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

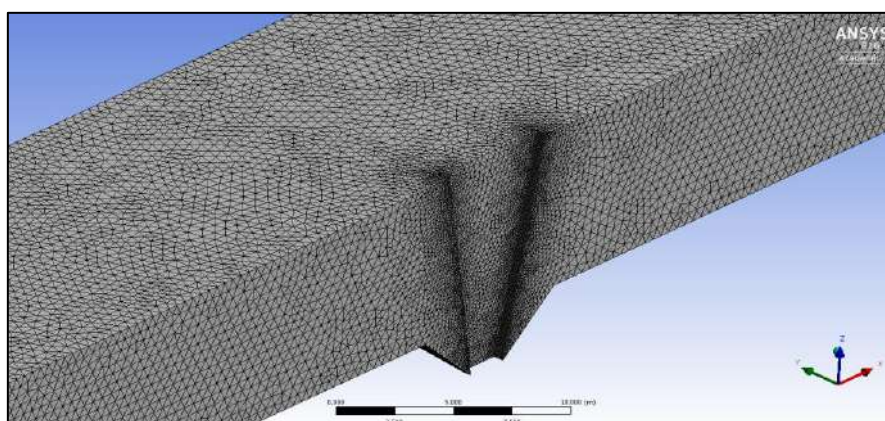


Figura 4.116 Malla PAB. Ensayo con foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

En la Tabla 4.8 se muestra el número de nodos y elementos.

Tabla 4.8 Nodos y elementos en Ensayo con foso de socavación PAB

Nodos	Elementos
2820947	2047285

Elaboración: Propia

4.4.3.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA). En las Figura 4.117 y Figura 4.118 se puede observar el mallado del dominio. Se aprecia una zona más densa en las caras del pilar y en el foso de socavación, porque se necesita desarrollar con mayor precisión los cambios de presión y velocidad producto del choque con el flujo.

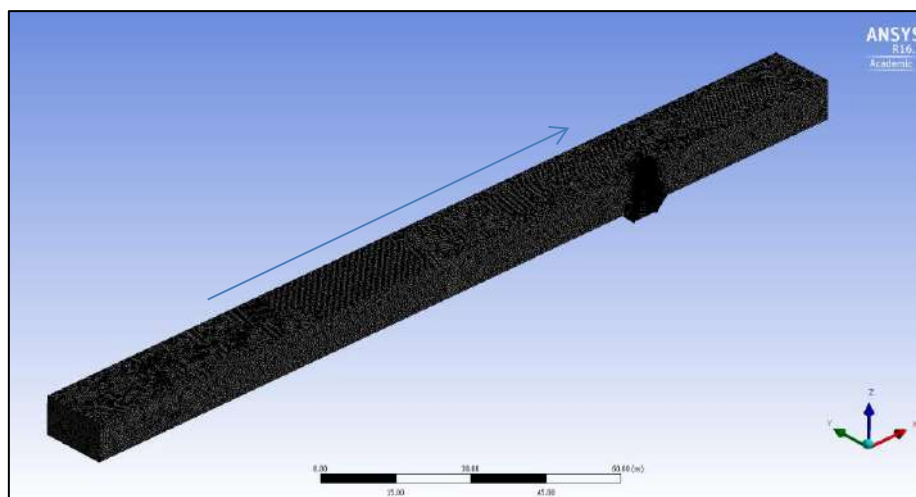


Figura 4.117 Malla PAA. Ensayo con foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

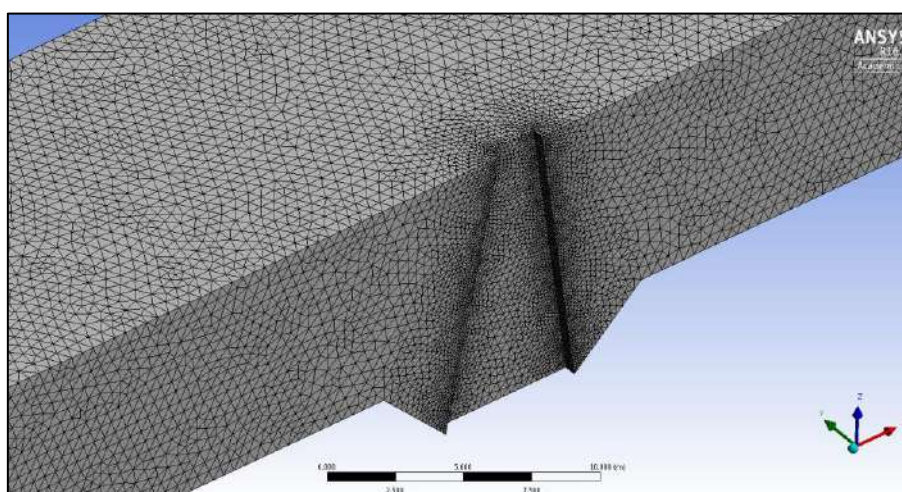


Figura 4.118 Malla PAA. Ensayo con foso de socavación. El flujo se produce en la dirección X.

Elaboración: Propia

En la Tabla 4.9 se muestra el número de nodos y elementos.

Tabla 4.9 Nodos y elementos en Ensayo con foso de socavación PAA

Nodos	Elementos
2834929	2055802

Elaboración: Propia

4.4.4 Física y configuración del solucionador

Es la última etapa del pre-procesamiento antes de dar solución al modelo. Se seleccionan los modelos físicos que se van a incluir en la simulación. Se especifican las propiedades de los fluidos y las condiciones de frontera. La física y configuración del solucionador es la misma para ambos casos.

En la Figura 4.119 se observa el espacio de trabajo para la física del modelo.

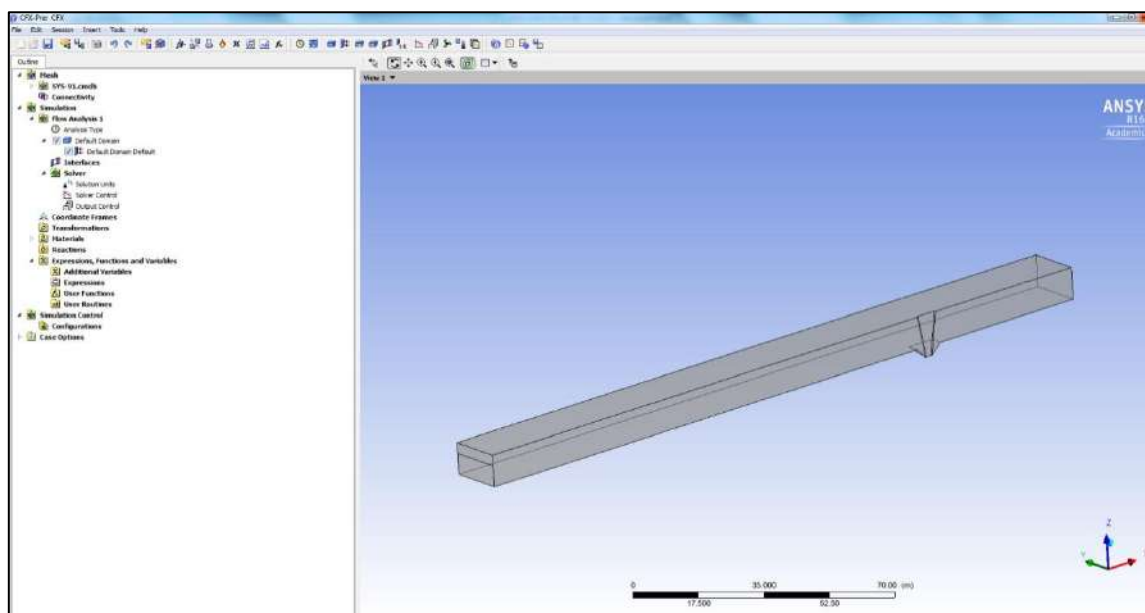


Figura 4.119 Espacio de trabajo CFX-Pre. Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

a) Propiedades de los fluidos

La configuración de las propiedades de los materiales incluidos en la simulación, se realiza en la carpeta *Flow Analysis - Materials*. Las propiedades del agua y aire, se detallan en la Figura 4.120 y Figura 4.121 respectivamente. Estos valores son establecidos de forma predeterminada por el programa; en este caso, no se ha modificado ningún valor. Para el agua y el aire, se especifican los valores de: densidad, masa molar, temperatura, etc.

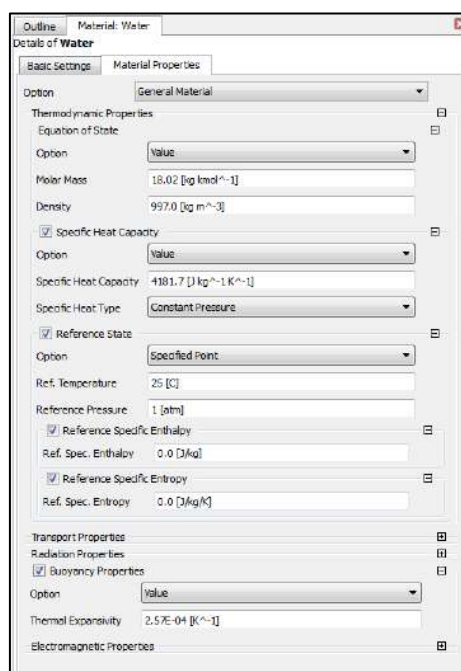


Figura 4.120 Propiedades del agua en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

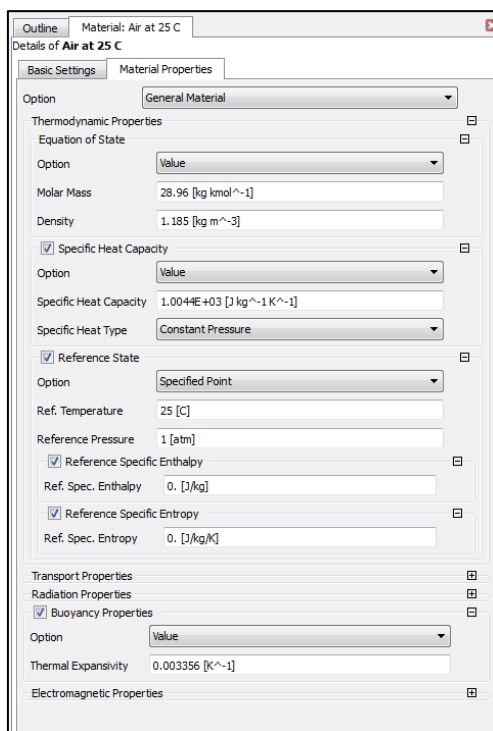


Figura 4.121 Propiedades del aire en Esanyo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

b) Modelos físicos

Se seleccionan los modelos físicos que se van a incluir en la simulación. La configuración se realiza en la carpeta *Flow Analysis - Default Domain*. En la Figura 4.122, Figura 4.123, Figura 4.124 y Figura 4.125 se muestra la interfaz de configuración. Algunos parámetros son predeterminados por el propio programa, de los cuales se modifican los siguientes (Tabla 4.10).

Tabla 4.10 Parámetros de *Flow Analysis-Default Domain* en Ensayo con foso de socavación.

Característica	Descripción
Tipo de análisis	<i>Steady State</i>
Materiales	Agua y aire
Presión de referencia	1 atm
Modelo de Flotabilidad	Sí
Fuerza gravitacional	Eje y
Densidad de referencia para flotabilidad	1.2 kg/m ³
Tipo de flujo	Turbulento
Modelo multifase	Homogéneo
Superficie libre	Sí
Tipo de modelo de turbulencia	<i>k-Epsilon</i>
Coeficiente de tensión superficial	0.072 N m ⁻¹

Tabla 4.10 Parámetros de *Flow Analysis-Default Domain* en Ensayo con foso de socavación (continuación)

Característica	Descripción
Modelo de tensión superficial	Superficie continua
Flujo primario	Agua
Transferencia en interfaces	Superficie libre

Elaboración: Propia

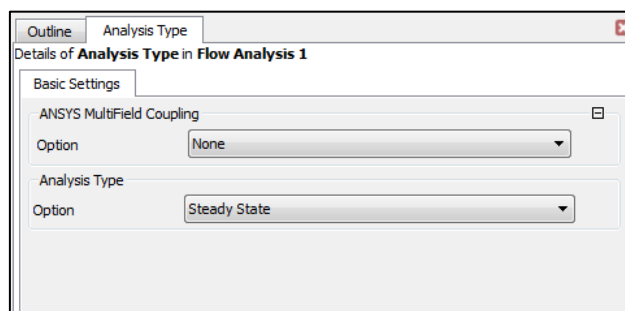


Figura 4.122 Tipo de análisis en Ensayo con foso de socavación

Elaboración: Propia

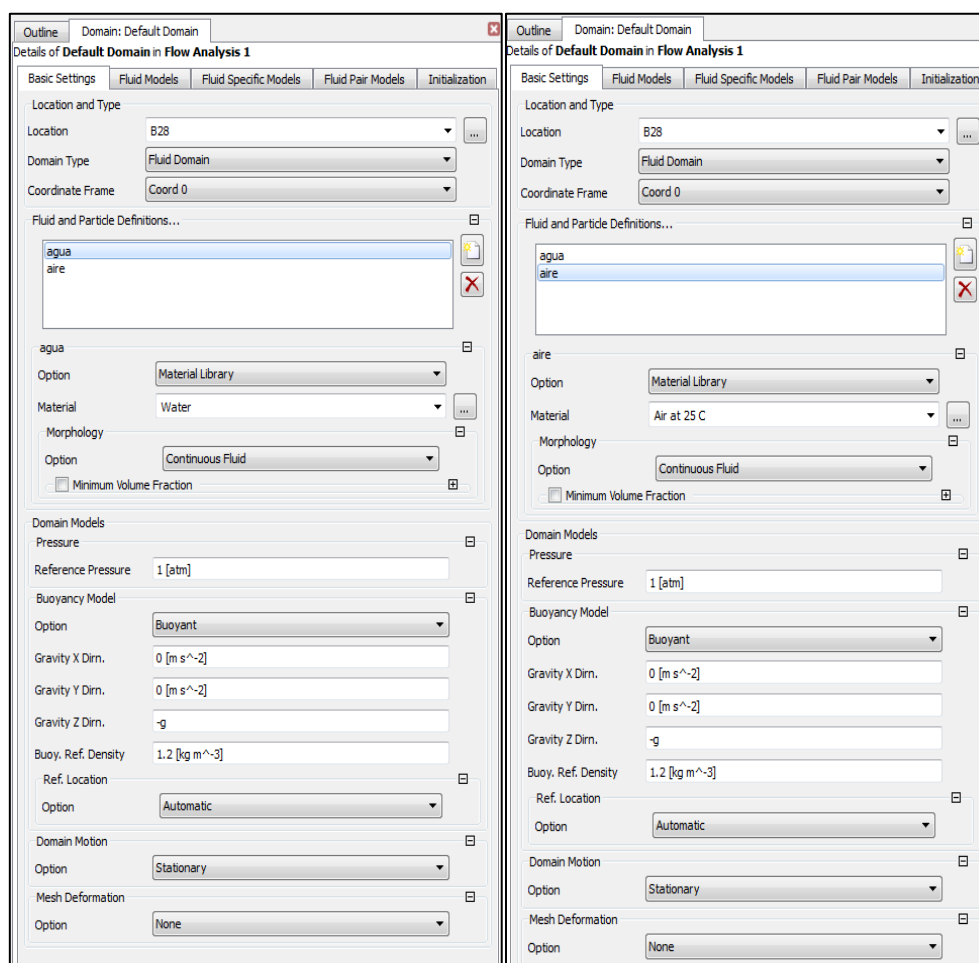


Figura 4.123 Materiales, Presión de referencia, Modelo de flotabilidad en Ensayo con foso de socavación

Elaboración: Propia

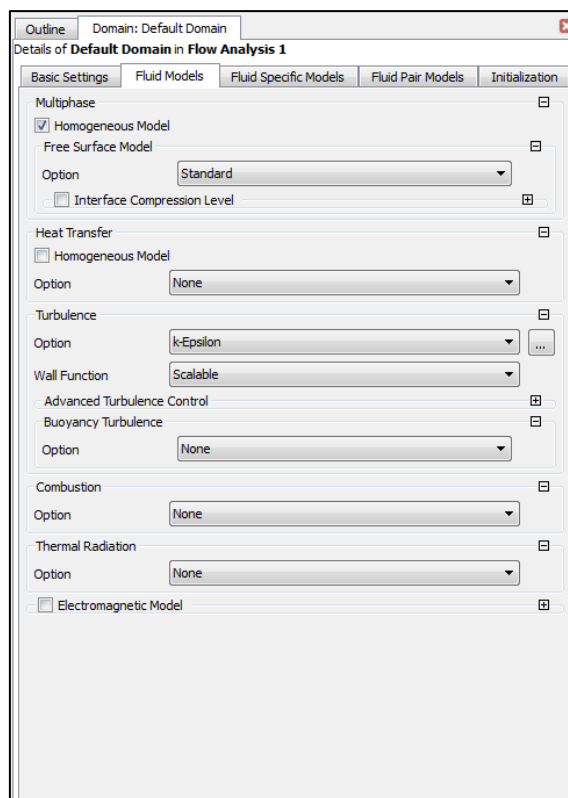


Figura 4.124 Modelo multifase, Modelo de turbulencia en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

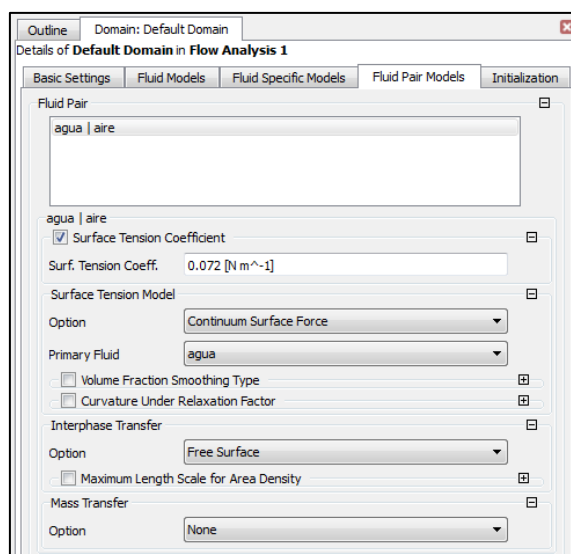


Figura 4.125 Coeficiente de Tensión Superficial, Modelo de tensión superficial, Transferencia de interfaces en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

c) Expresiones

Mediante un conjunto de expresiones se establece:

- *Wdepth*: el tirante de agua aguas arriba y debajo de la estructura, 6m.
- *WaterVF*: La fracción del volumen del dominio para el agua y aire.

- **Backpressure:** la presión de salida, la cual mantiene el tirante de ingreso.

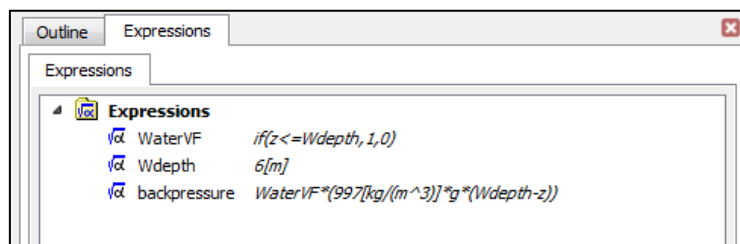


Figura 4.126 Expresiones WaterVF, Wdepth, Backpressure en Ensayo con foso de socavación

Elaboración: Propia

d) Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son un conjunto de propiedades o condiciones en las superficies de los dominios, y se requieren para definir completamente la simulación del flujo. El tipo de condición de frontera que se puede establecer depende de la superficie delimitadora.

Son las condiciones de contorno las que producen diferentes soluciones para una determinada geometría y un conjunto de modelos físicos. Por lo tanto, las condiciones de frontera determinan en gran medida las características de la solución que se obtiene. Es importante establecer condiciones de frontera que reflejen con precisión la situación real para que pueda obtener resultados precisos.

- **Inlet**

Este tipo de condición se utiliza para definir la velocidad de entrada del flujo de los materiales. La condición se aplica a la superficie de frontera Inlet. El dato de velocidad establecido para el flujo de agua es de 4 m/s, sin embargo, también se aplica automáticamente para el aire. La velocidad ingresa uniforme en ambos casos y cada uno empieza a desarrollar un perfil de velocidad distinto hasta conseguir normalizarse. En el caso del agua, depende de la rugosidad del fondo, geometría, tirante, etc. En la interface o superficie libre, tanto la velocidad como los esfuerzos de corte entre ambos fluidos deben coincidir. Se considera que la velocidad del aire no influye en el desarrollo del perfil de velocidad del agua, debido a que la viscosidad del agua es mucho mayor que la del aire. En la Figura 4.127, Figura 4.128, Figura 4.129 y Figura 4.130 se observa la configuración de la condición de frontera *Inlet*.

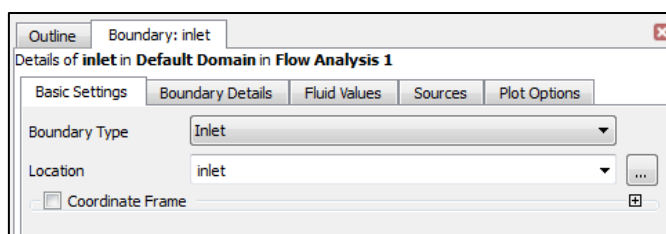


Figura 4.127 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Asignación de la BC *Inlet* a la superficie *Inlet* en Ensayo con foso de socavación

Elaboración: Propia

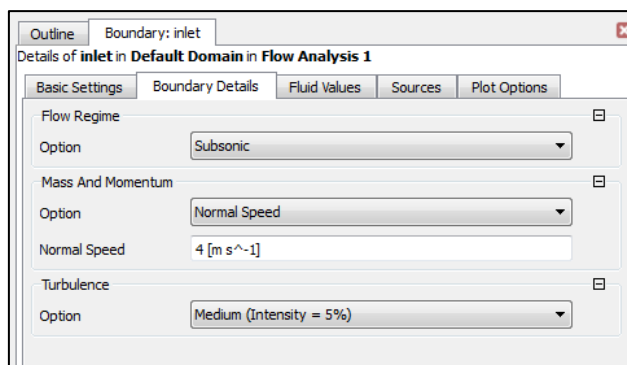


Figura 4.128 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Velocidad de entrada de los materiales en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

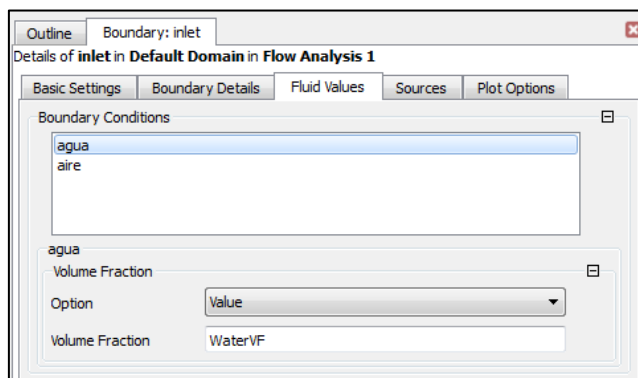


Figura 4.129 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Definición de VF para el agua en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

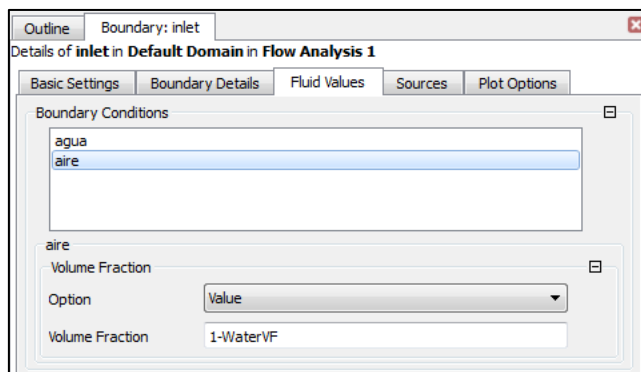


Figura 4.130 Cuadro de diálogo de la BC *inlet*. Definición de VF para el aire en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- Opening

Este tipo de condición permite que el fluido cruce la superficie límite en cualquier dirección. Por ejemplo, todo el fluido podría fluir hacia el dominio en la abertura, o todo el fluido podría fluir fuera del dominio, o una mezcla de los dos podría ocurrir. Se puede especificar con un valor de presión relativa.

La condición se aplica para las superficies de frontera Outlet y Top. En la superficie de frontera *outlet* se asigna el valor de presión relativa definida por la expresión *backpressure*, que permite el ingreso y salida de agua y aire.

En la Figura 4.131, Figura 4.132, Figura 4.133 y Figura 4.134 se observa la configuración para la condición *Opening* en la superficie outlet. En la superficie de frontera Top asigna el valor de presión relativa 0 Pa, que permite el ingreso y salida de aire. En la Figura 4.135, Figura 4.136, Figura 4.137 y Figura 4.138 se observa la configuración para la condición *Opening* en la superficie Top.

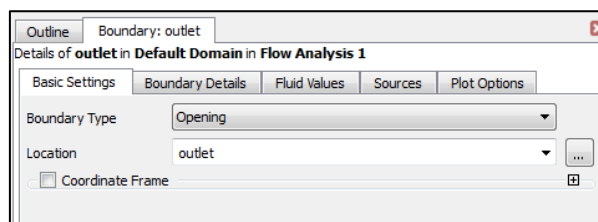


Figura 4.131 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Asignación de la BC *opening* a la superficie *Outlet* en Ensayo con foso de socavación
Elaboación: Propia

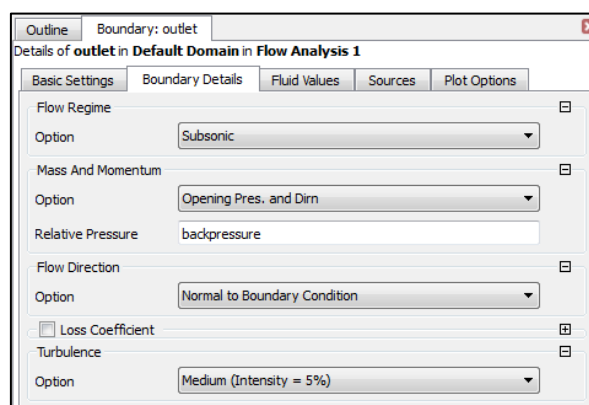


Figura 4.132 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Presión relativa. Superficie *Outlet* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

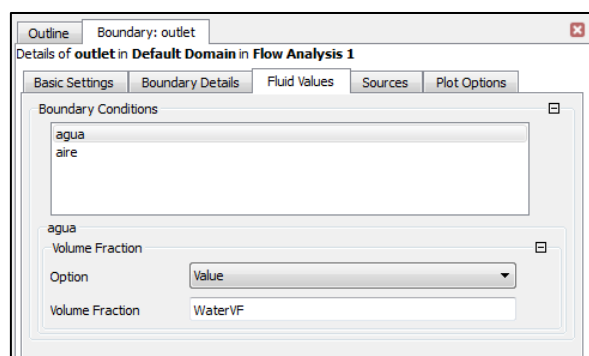


Figura 4.133 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Definición de VF para el agua. Superficie *Outlet* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

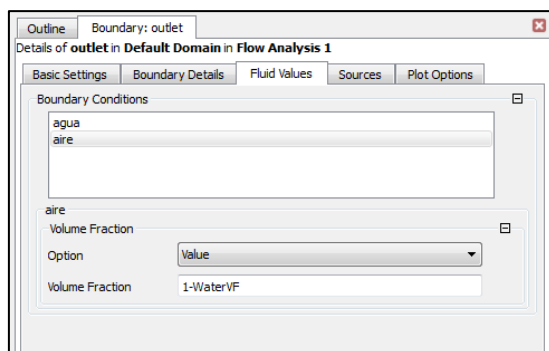


Figura 4.134 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Definición de VF para el aire.
Superficie Outlet en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

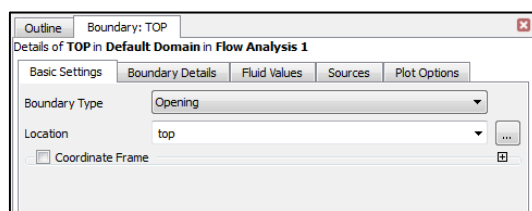


Figura 4.135 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Asignación de la BC *opening* a la superficie *Top* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

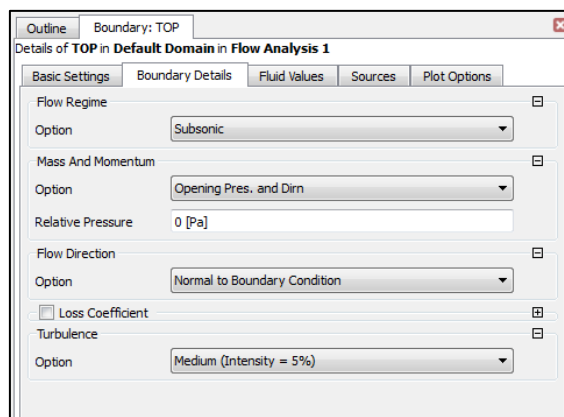


Figura 4.136 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Presión relativa. Superficie Top en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

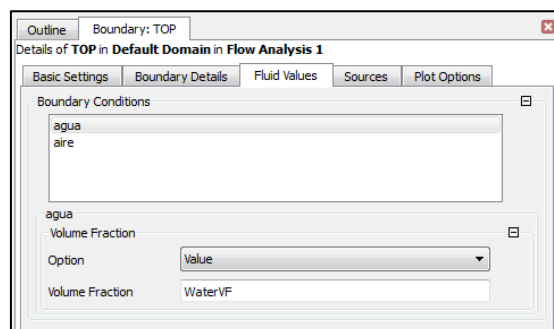


Figura 4.137 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Definición de VF para el agua.
Superficie Top en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

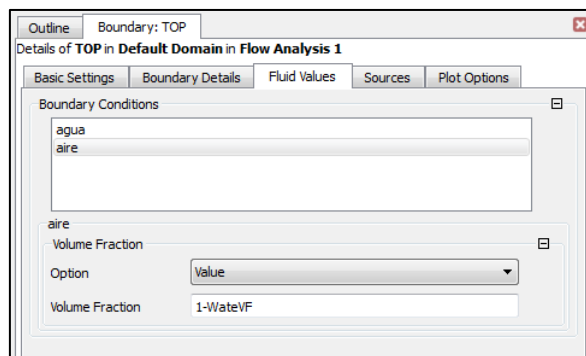


Figura 4.138 Cuadro de diálogo de la BC *opening*. Definición de VF para el aire.
Superficie *Top* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- **Wall**

Este tipo de condición permite simular una pared sólida a los límites del flujo del fluido. La condición se aplica para las superficies de frontera *Bed* y *Pilar*. Dentro de la configuración, en ambos se ha elegido la opción *No slip Wall*, porque es el tipo más común de implementación de la condición *Wall*. El fluido inmediatamente al lado de la pared asume la velocidad de la pared, que es cero por defecto. Para simulaciones utilizando modelos de turbulencia, se puede describir la superficie de la pared como lisa (*Smooth*) o áspera (*Rough*). En ambas superficies, se asignó la pared como lisa. Para las paredes rugosas, se requiere la rugosidad equivalente del grano de arena como parámetro de entrada. En la Figura 4.139 y Figura 4.140 se observa la configuración para la condición *Wall* en la superficie *Bed*. Así mismo, en la Figura 4.141 y Figura 4.142 se observa la configuración para la condición *Wall* en la superficie *Pilar*.

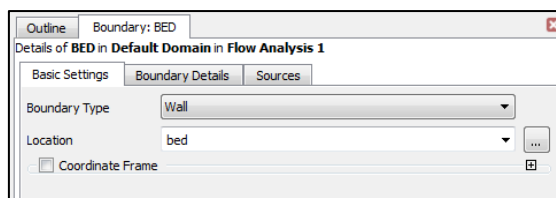


Figura 4.139 Cuadro de diálogo de la BC *wall*. Asignación de la BC *wall* a la superficie *Bed* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

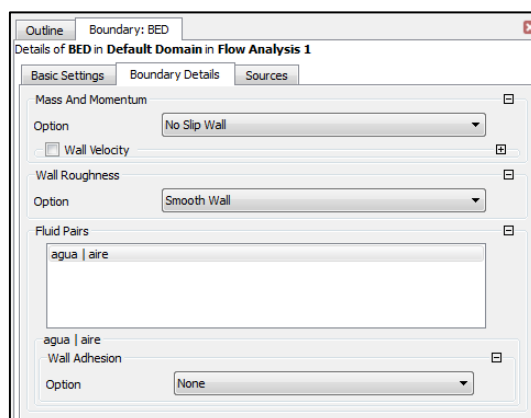


Figura 4.140 Cuadro de diálogo de la BC *wall*. *No Slip Wall*, *Smooth Wall*. Superficie *Bed* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

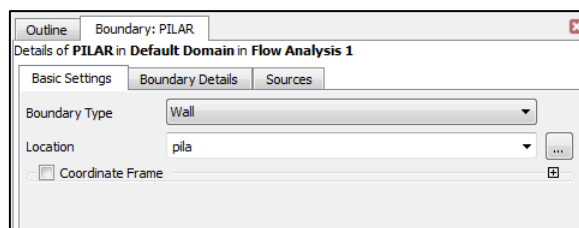


Figura 4.141 Cuadro de diálogo de la BC *wall*. Asignación de la BC *wall* a la superficie Pilar en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

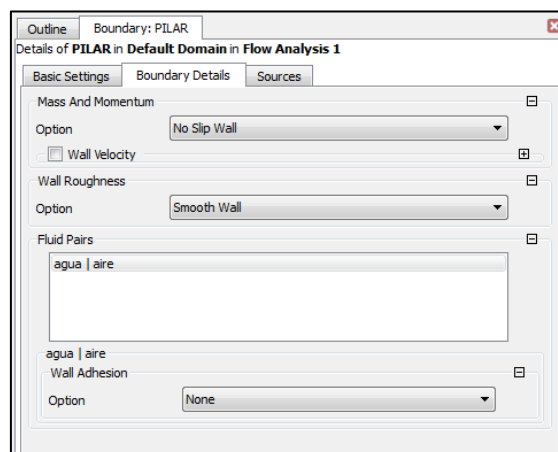


Figura 4.142 Cuadro de diálogo de la BC *wall*. No Slip Wall, Smooth Wall. Superficie Pilar en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

- *Symmetry*

Este tipo de condición tiene la propiedad de que todos los aspectos del flujo son simétricos sobre algún plano físico (plano).

Un problema es simétrico respecto a un plano cuando el flujo en un lado del plano es una imagen similar de flujo en el lado opuesto. Un caso particular puede tener más de un plano de simetría.

La condición se aplica para las superficies de frontera Symmetry 1 y Symmetry 2. En ambos, asume que el campo de flujo es simétrico.

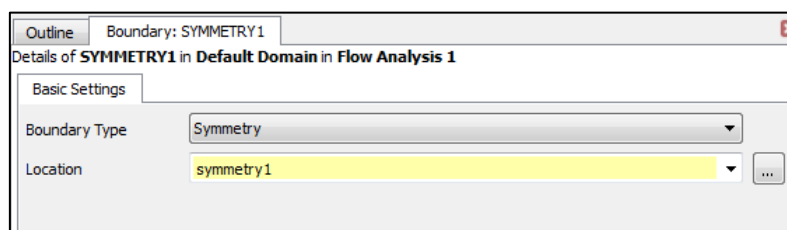


Figura 4.143 Cuadro de diálogo de la BC *symmetry*. Asignación de la BC *symmetry* a la superficie *symmetry1* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

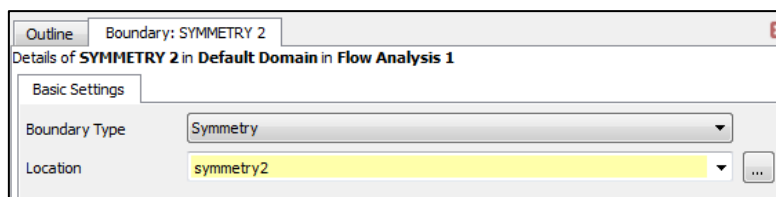


Figura 4.144 Cuadro de diálogo de la BC *symmetry*. Asignación de la BC *symmetry* a la superficie *symmetry2* en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

En la Tabla 4.11 se presenta de forma resumida las condiciones de frontera para el ensayo sin foso de socavación.

Tabla 4.11 Tabla resumida de las condiciones de frontera para el ensayo sin foso de socavación

Superficie de frontera	Condición de frontera	Detalle de Frontera	Valor de fracción de Fluido
Inlet	Inlet	$V = 4 \text{ m/s}$	Agua: WaterVF Aire: 1- WaterVF
Outlet	Opening	backpressure	Agua: WaterVF Aire: 1- WaterVF
Top	Opening	Relative pressure = 0	Agua: WaterVF Aire: 1- WaterVF
Pila	Wall	No slip Wall	-
Bed	Wall	No slip Wall	-
Symmetry 1	Symmetry	-	-
Symmetry 2	Symmetry	-	-

Elaboración: Propia

e) Unidades

En la Figura 4.145 se muestran las Unidades trabajadas en el modelo.

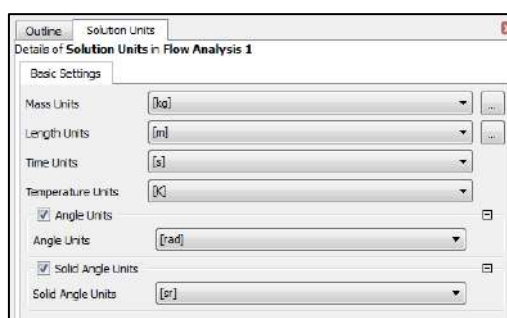


Figura 4.145 Unidades en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

f) Control de la Solución

En la Figura 4.146, Figura 4.147, Figura 4.148 se muestra la configuración del control del *Solver*. Se ingresa el número de iteraciones necesario para que la solución converja. En ambos casos, se consideró un número de 100 iteraciones. Además, se observan algunas opciones avanzadas que son seleccionadas.

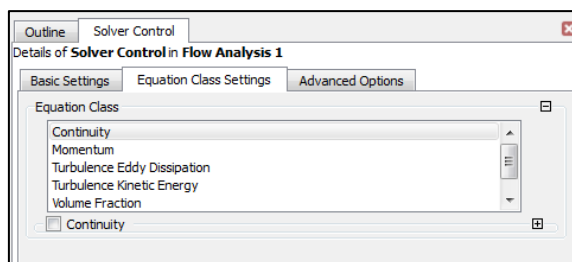


Figura 4.146 Interfaz control de la solución. Configuración de ecuaciones en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

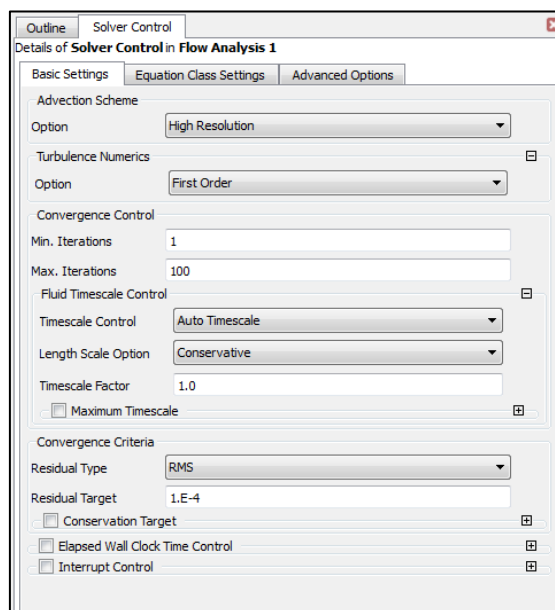


Figura 4.147 Interfaz control de la solución. Configuración básica en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

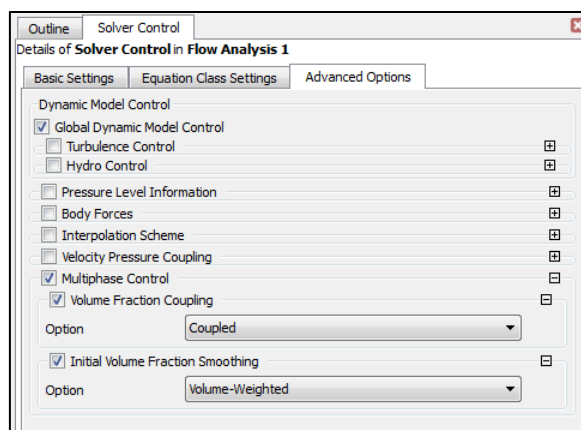


Figura 4.148 Interfaz control de la solución. Opciones avanzadas en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

En la Tabla 4.12 se presenta de forma general los mecanismos para el control de la solución.

Tabla 4.12 Control de la solución

Contro de la solución	Máximo 100 iteraciones
Criterio de convergencia	10^{-4}
Fracción de volumen inicial	Volumen - Weighted

Elaboración: Propia

4.4.4.1 PAB

Pilar con angostamiento en la parte baja (PAB). En la Figura 4.149 se muestra la representación final de la física y configuración del solucionador. Los colores: negro, azul y rojo, representan la condición de frontera: *Inlet*, *Opening* y *Symmetry*, respectivamente.

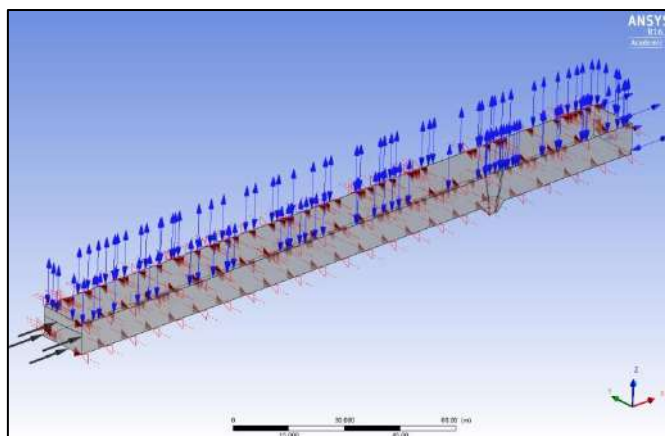


Figura 4.149 Representación de la física y configuración del solucionador en PAB con foso de socavación

Elaboración: Propia

4.4.4.2 PAA

Pilar con angostamiento en la parte alta (PAA). En la Figura 4.150 se muestra la interfaz gráfica de la física y configuración del solucionador. Los colores: negro, azul y rojo, representan la condición de frontera: *Inlet*, *Opening* y *Symmetry*, respectivamente.

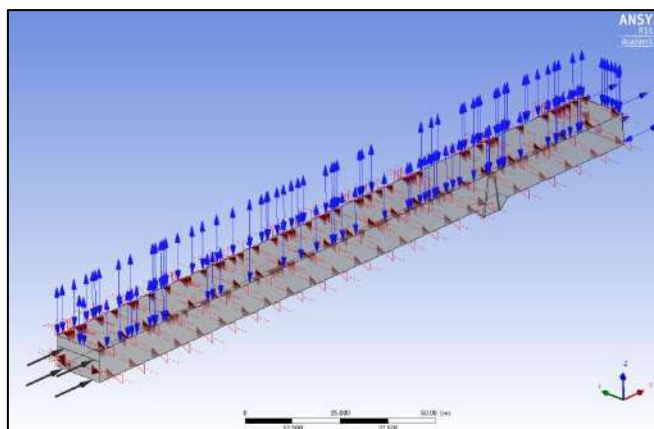


Figura 4.150 Representación de la física y configuración del solucionador en PAA con foso de socavación

Elaboración: Propia

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de la solución de cada ensayo. El Postprocesador es el componente de ANSYS CFX utilizado para analizar, visualizar y presentar los resultados de forma interactiva.

En la Figura 5. 1 se muestra el espacio de trabajo del Postprocesador.

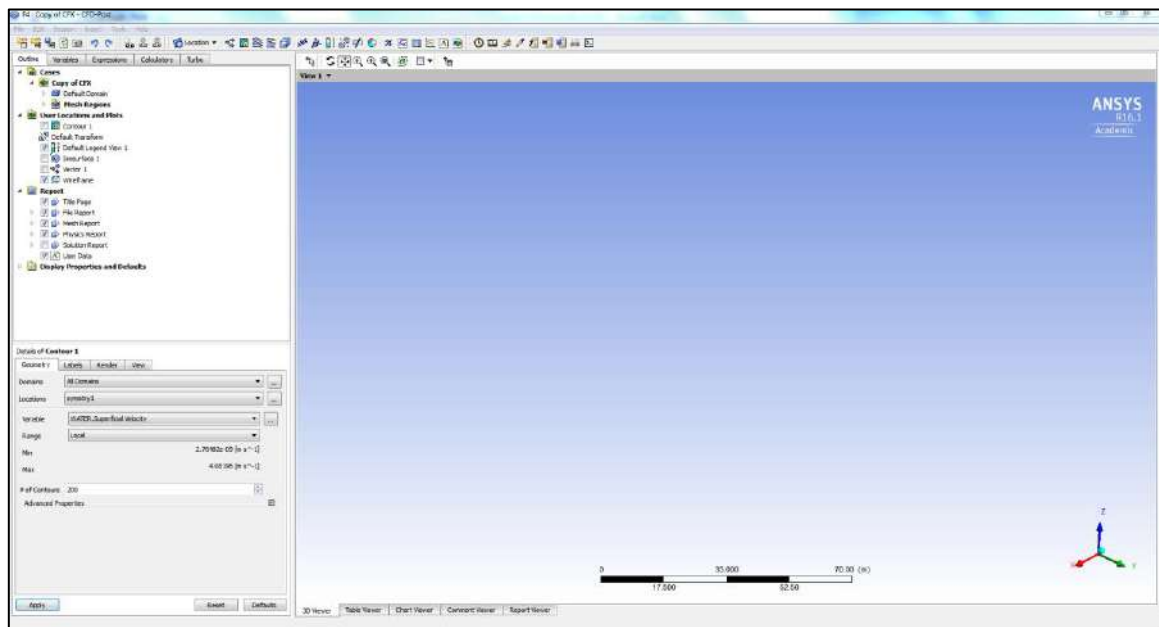


Figura 5. 1 Espacio de trabajo del Post procesador
Elaboración: Propia

El análisis se realizará mediante herramientas:

- **Isosurface** : Visualización de la superficie libre
- **Contour** : Visualización de la variación de variables escalares (variables que sólo tienen magnitud, no dirección, como temperatura, presión y velocidad) a través del dominio. Solo se observará la velocidad.
- **Vector** : Gráficos vectoriales que muestran la dirección y magnitud del flujo.

5.1 Ensayo sin foso de socavación

5.1.1 PAB

Isosurface

En la Figura 5. 2, Figura 5.3 y Figura 5.4 se visualiza la interfaz de superficie del agua alrededor del pilar. Se puede observar una onda en la cara del pilar aguas arriba, esto se produce porque el flujo impacta con la cara del pilar generando un flujo ascendente hacia la superficie que eleva el nivel del agua. El tirante en la cara aguas arriba del pilar es mayor que el tirante en la cara aguas abajo del pilar, esto se produce porque la pendiente energética aumenta y el tirante decrece.

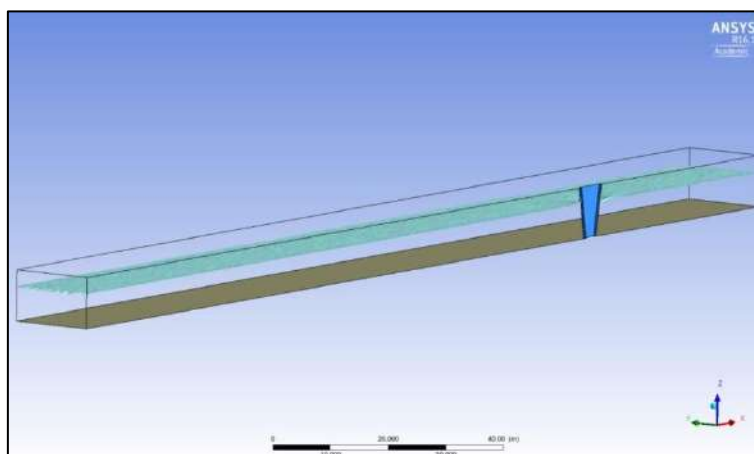


Figura 5. 2 Superficie libre. PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

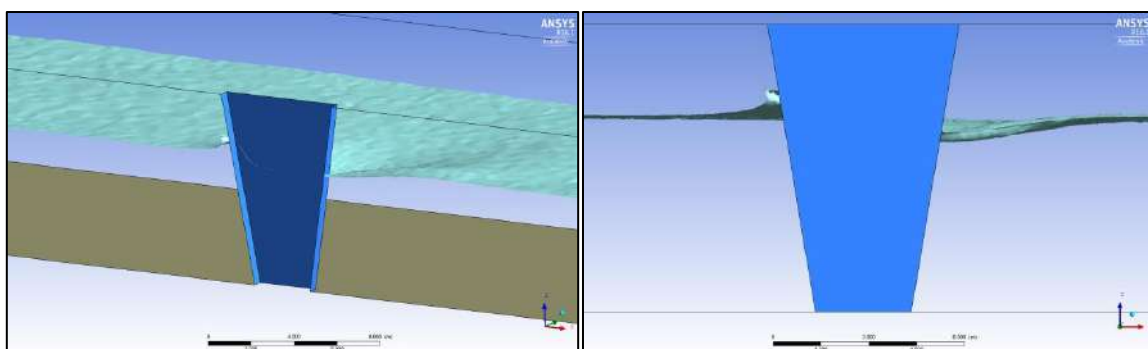


Figura 5. 3 Superficie libre.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

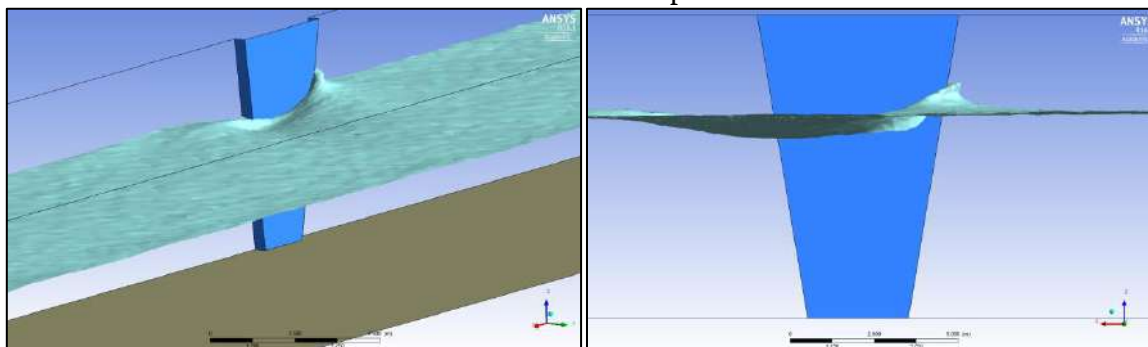


Figura 5. 4 Superficie libre.PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Contours

En Figura 5. 5 y Figura 5. 6 se visualiza la magnitud de la velocidad en el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Aguas arriba se observa que la velocidad disminuye al acercarse a la cara del pilar. Se aprecia que la velocidad no es uniforme en la cara y los valores no son similares a cero. No se observa el desarrollo del vórtice de herradura cerca al cauce; se deduce que tal comportamiento es por asumir un cauce sin profundización.

Aguas abajo se observa la zona de vórtices con velocidades similares a cero. Se aprecia una zona de velocidades altas en la cara del pilar y el fondo. En el Anexo A se puede visualizar los valores extraídos de velocidad aguas arriba y aguas debajo de la estructura.

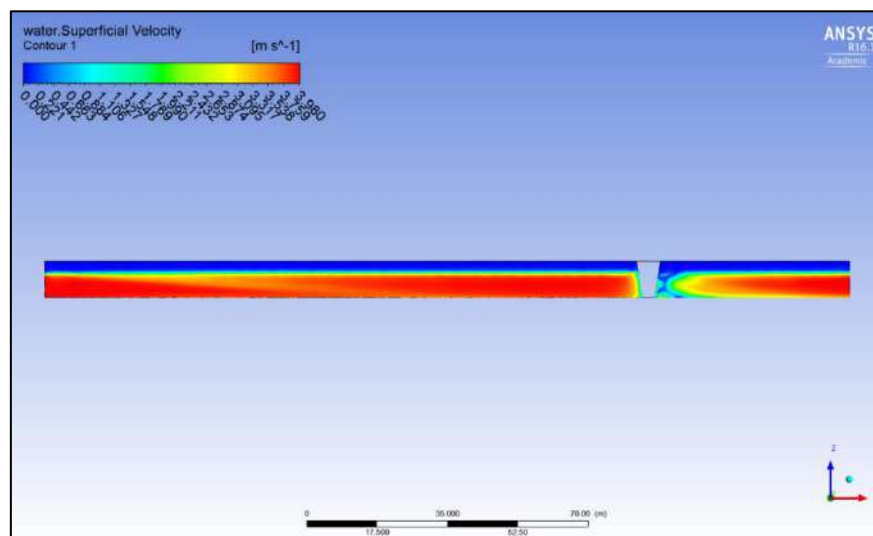


Figura 5. 5 Magnitud de velocidad en el eje. PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

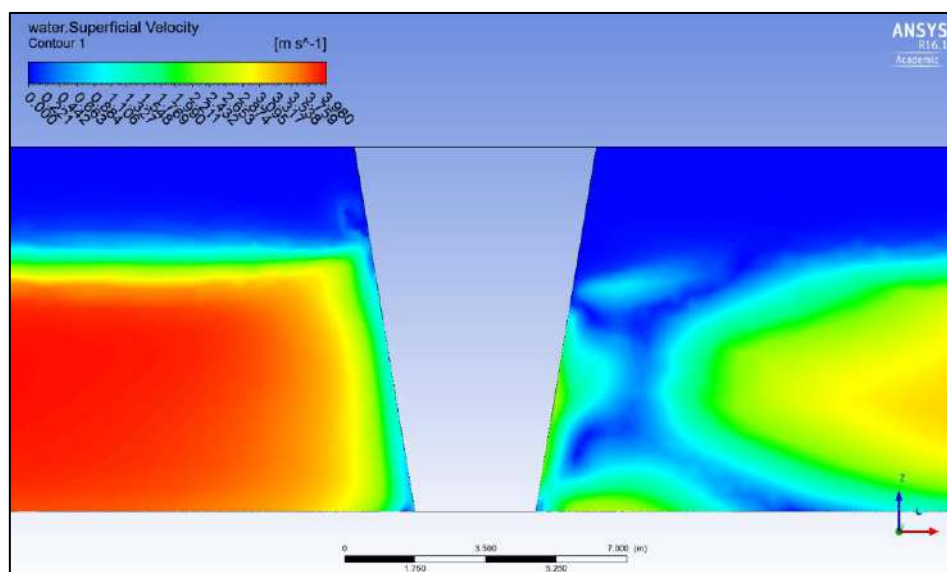


Figura 5. 6 Magnitud de velocidad en el eje. PAB en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Vector

En la Figura 5. 7 se muestran la dirección y magnitud de la velocidad del flujo en el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Aguas arriba se observa el choque entre las líneas del flujo y el pilar. Las líneas tienden ir hacia el fondo, aquello puede ser ocasionado por la geometría del pilar. En la superficie del agua y en la región próxima a aquella, se observa que las líneas tienden ir hacia arriba al acercarse a la cara del pilar; se deduce que es producto de la trayectoria ascendente del flujo al chocar con la estructura.

Aguas abajo se observa la zona de vórtices. Las líneas no siguen una trayectoria definida. Se aprecia una zona más densa en el cauce y en la cara del pilar.

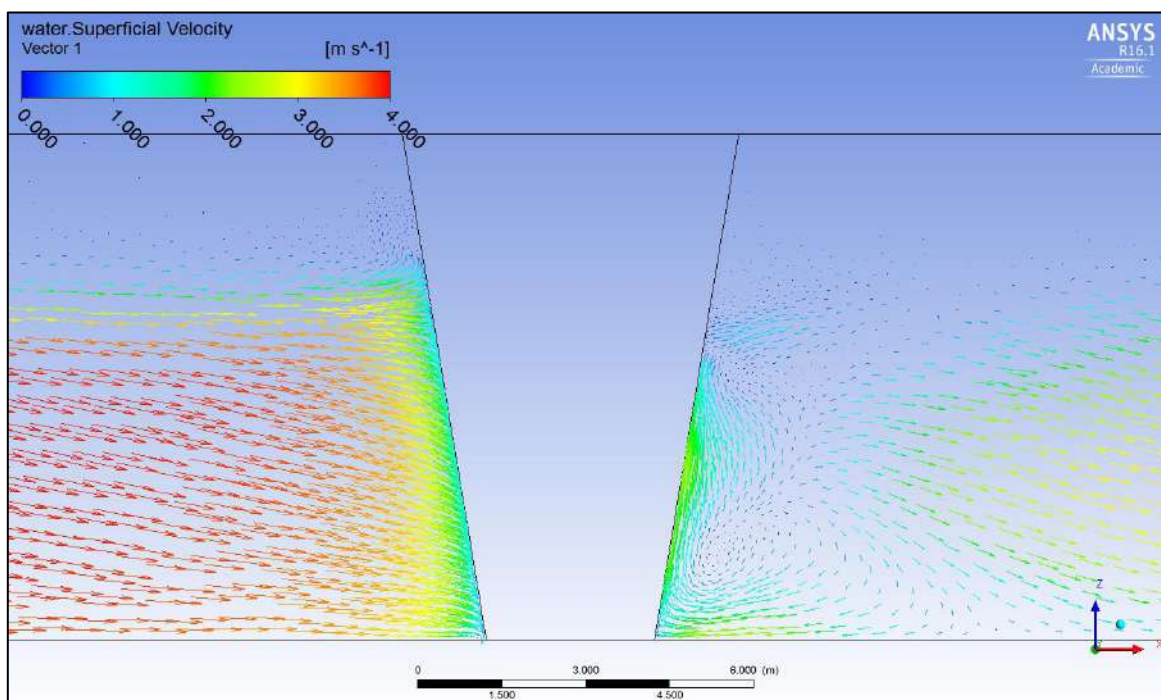


Figura 5. 7 Magnitud y dirección de Vectores velocidad. PAB en Ensayo sin foso de socavación

Elaboración: Propia

5.1.2 PAA

Isosurface

En la Figura 5. 8, Figura 5.9, Figura 5.10 se visualiza la interfaz de superficie del agua alrededor del pilar.

Se observa una onda en la cara del pilar aguas arriba, esto se produce porque el flujo impacta con la cara del pilar generando un flujo ascendente hacia la superficie que eleva el nivel del agua.

El tirante en la cara aguas arriba del pilar es mayor que el tirante en la cara aguas abajo del pilar, esto se produce porque la pendiente energética aumenta y el tirante decrece.

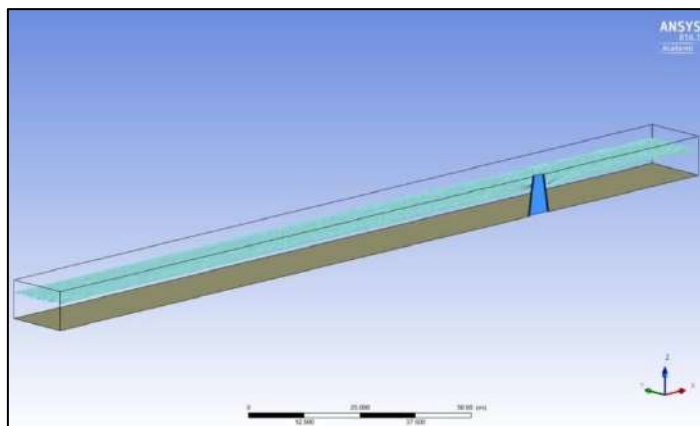


Figura 5. 8 Superficie libre.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

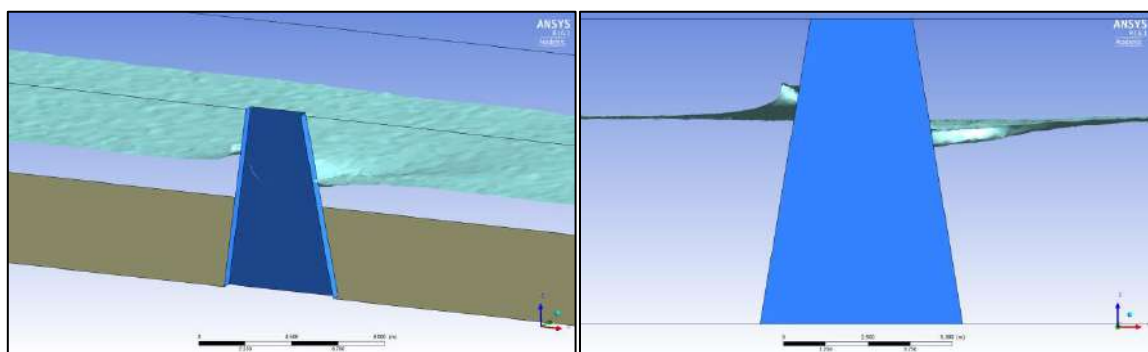


Figura 5. 9 Superficie libre.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

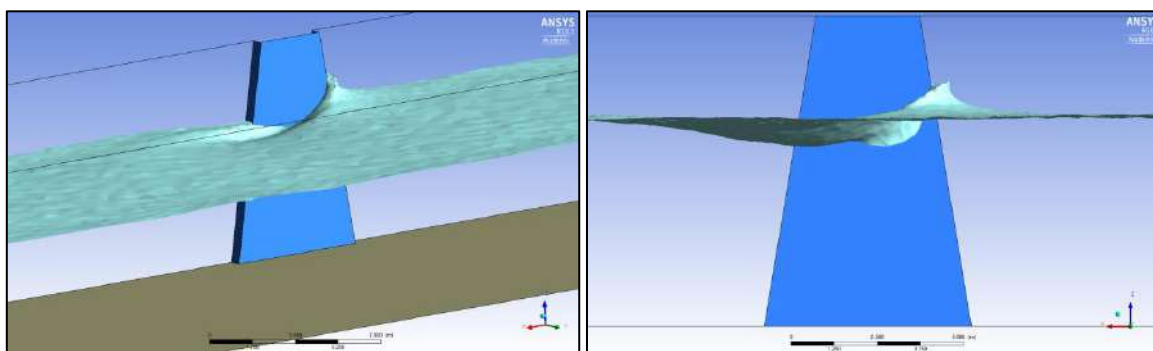


Figura 5. 10 Superficie libre.PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Contours

En la Figura 5. 11, Figura 5. 12 se visualiza la magnitud de la velocidad en el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Aguas arriba se observa que la velocidad disminuye al acercarse a la cara del pilar. Se aprecia una zona uniforme de velocidades cercanas a cero.

No se observa el desarrollo del vórtice de herradura cerca al cauce; se deduce que tal comportamiento es por asumir un cauce sin profundización

Aguas abajo se observa la zona de vórtices con velocidades similares a cero. A diferencia del caso anterior, no se aprecia una zona de velocidades altas en el cauce y en la cara del pilar.

En el Anexo A se pueden visualizar los valores extraídos de velocidad aguas arriba y aguas debajo de la estructura.

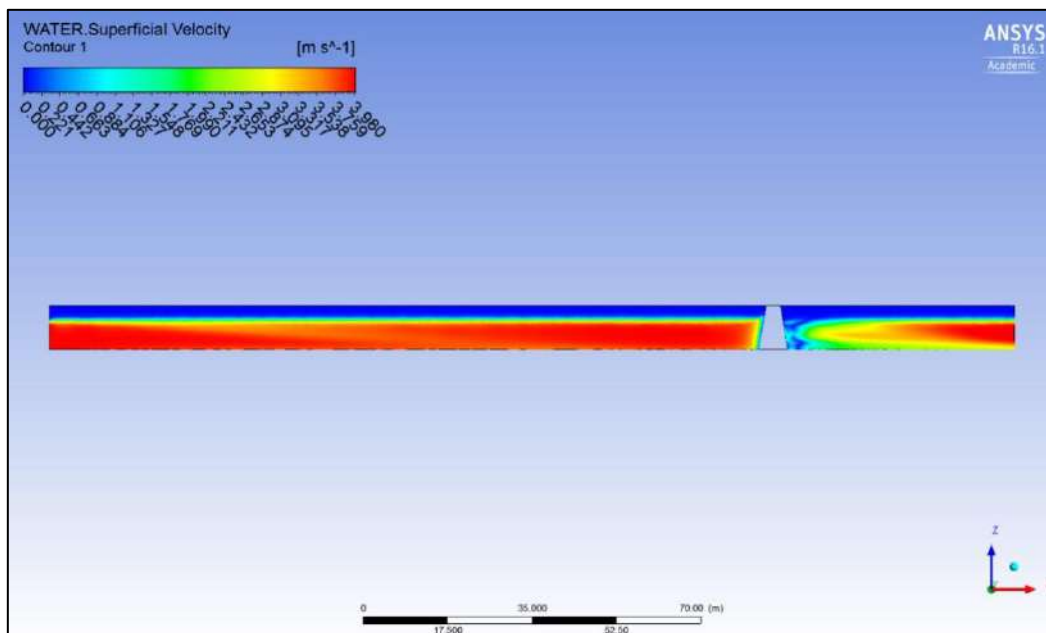


Figura 5. 11 Magnitud de velocidad en el eje. PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

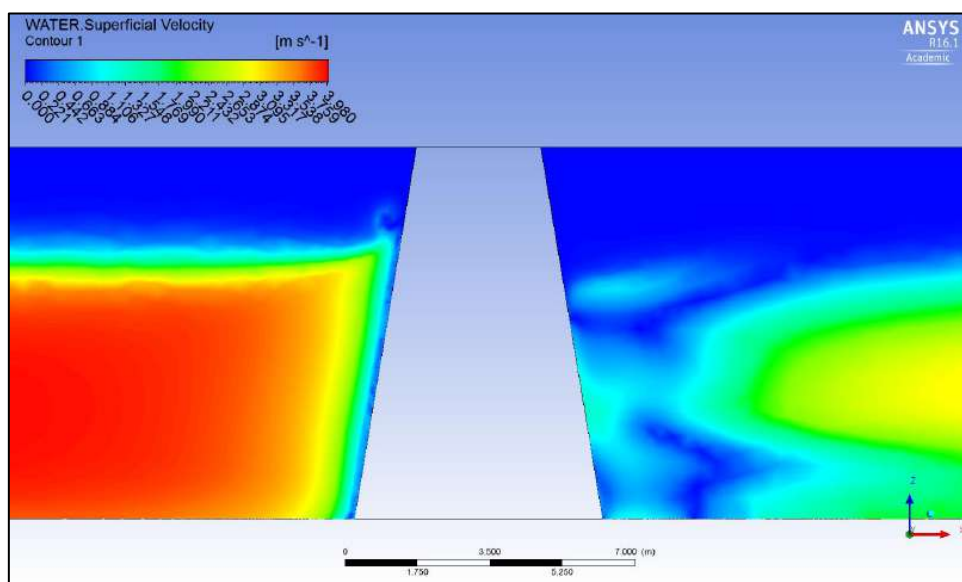


Figura 5. 12 Magnitud de velocidad en el eje. PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

Vector

En la Figura 5. 13 se muestran la dirección y magnitud de la velocidad del flujo en el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Aguas arriba se observa el choque entre las líneas del flujo y el pilar.

Las líneas tienden ir hacia arriba y no hacia el fondo como en el caso anterior, aquello puede ser ocasionado por la geometría del pilar.

En la superficie y en la región próxima a aquella, se observa que las líneas tienden ir hacia arriba al acercarse a la cara del pilar; se deduce que es producto de la trayectoria ascendente del flujo al chocar con la estructura.

Aguas abajo se observa la zona de vórtices. Las líneas no siguen una trayectoria definida.

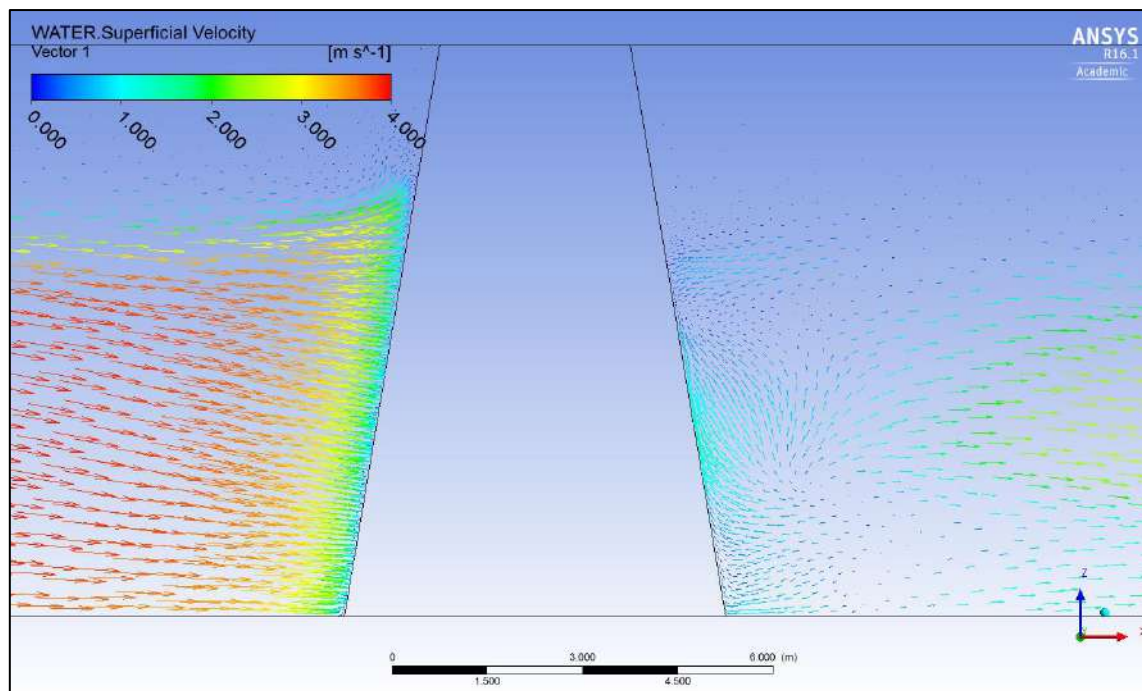


Figura 5. 13 Magnitud y dirección de Vectores velocidad. PAA en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

5.2 Ensayo con foso de socavación

5.2.1 PAB

Isosurface

En la Figura 5. 14, Figura 5.15, Figura 5.16 se visualiza la interfaz de superficie del agua alrededor del pilar.

Se puede observar una onda en la cara del pilar aguas arriba, esto se produce porque el flujo impacta con la cara del pilar generando un flujo ascendente hacia la superficie que eleva el nivel del agua.

El tirante en la cara aguas arriba del pilar es mayor que el tirante en la cara aguas abajo del pilar, esto se produce porque la pendiente energética aumenta y el tirante decrece.

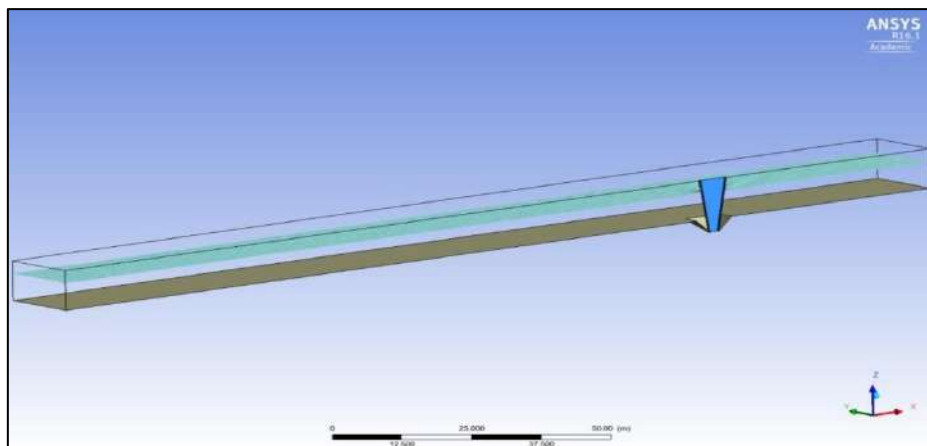


Figura 5. 14 Superficie libre. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

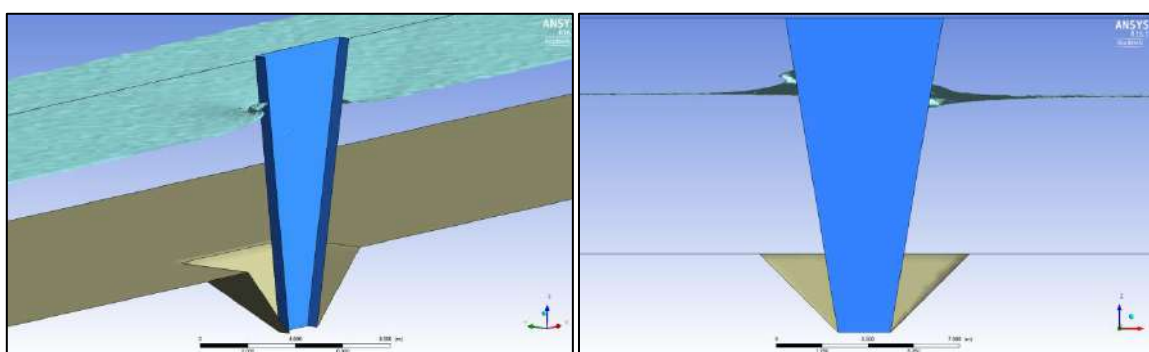


Figura 5. 15 Superficie libre. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

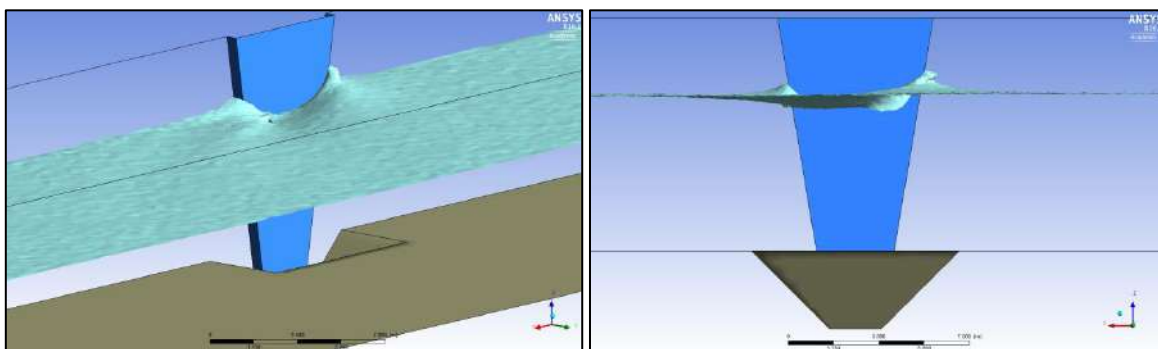


Figura 5. 16 Superficie libre. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

Contours

En la Figura 5. 17 y Figura 5. 18 se visualiza la magnitud de la velocidad en el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Agua arriba se observa que la velocidad disminuye al acercarse a la cara del pilar. Se aprecia que la velocidad fuera del foso de socavación no es uniforme en la cara del pilar y los valores no son similares a cero. En la región inclinada del cauce dentro del foso se aprecia una zona de velocidades con valores cercanos a cero. En la región de ingreso al foso, se observa una zona de velocidades altas; se deduce que el foso seguirá

amplificándose. Se muestra en la cara del pilar dentro del foso una zona de velocidades altas.

Aguas abajo se aprecia una zona de velocidades altas en la cara del pilar. Se observa en la región de salida del foso de socavación una zona de velocidades altas; se deduce que el foso seguirá amplificándose.

En el Anexo B se pueden visualizar los valores extraídos de velocidad aguas arriba y aguas debajo de la estructura.

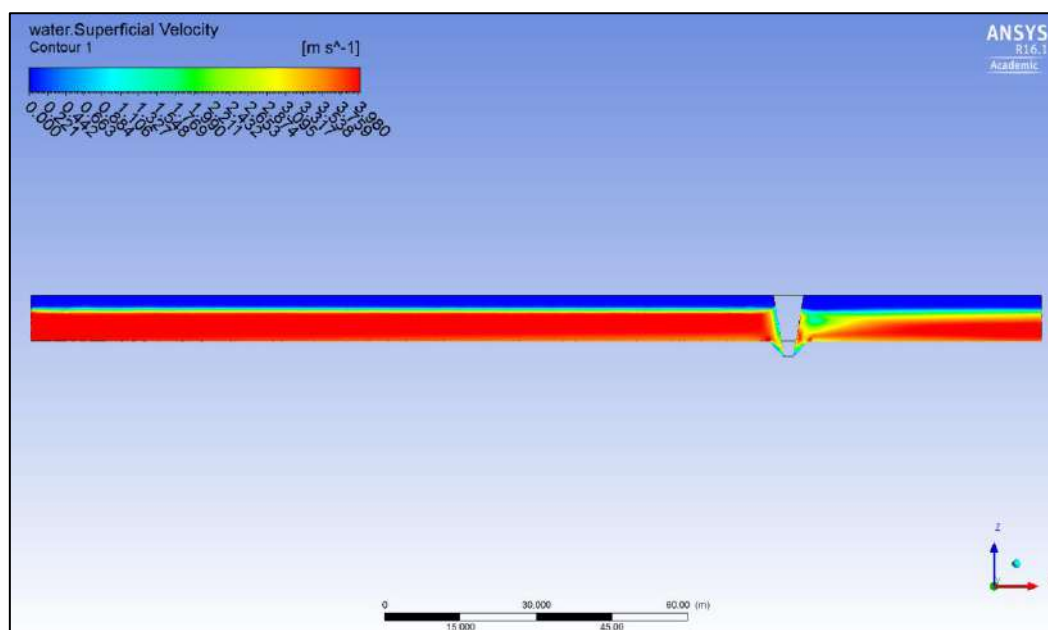


Figura 5. 17 Magnitud de velocidad en el eje. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

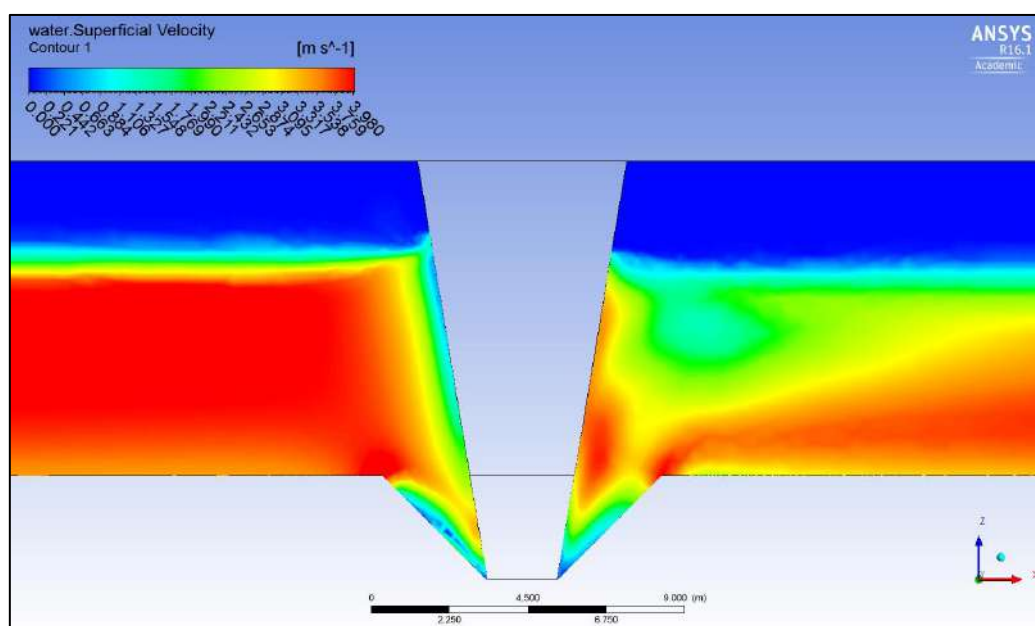


Figura 5. 18 Magnitud de velocidad en el eje. PAB en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

Vector

En la Figura 5. 19 se muestran la dirección y magnitud de la velocidad del flujo en el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Aguas arriba se observa el choque entre las líneas del flujo y el pilar. Fuera del foso de socavación las líneas tienden ir hacia el fondo, aquello puede ser ocasionado por la geometría del pilar. Se aprecia que las líneas paralelas al cauce fuera del foso no siguen la misma trayectoria paralela cuando ingresan a aquel. Dentro del foso se aprecia la trayectoria del vórtice de herradura. En la superficie y en la región próxima a aquella, se observa que las líneas tienden ir hacia arriba al acercarse a la cara del pilar; se deduce que es producto de la trayectoria ascendente del flujo al chocar con la estructura.

Aguas abajo se observa la zona de vórtices. Las líneas no siguen una trayectoria definida. Se aprecia una zona más densa en la cara del pilar

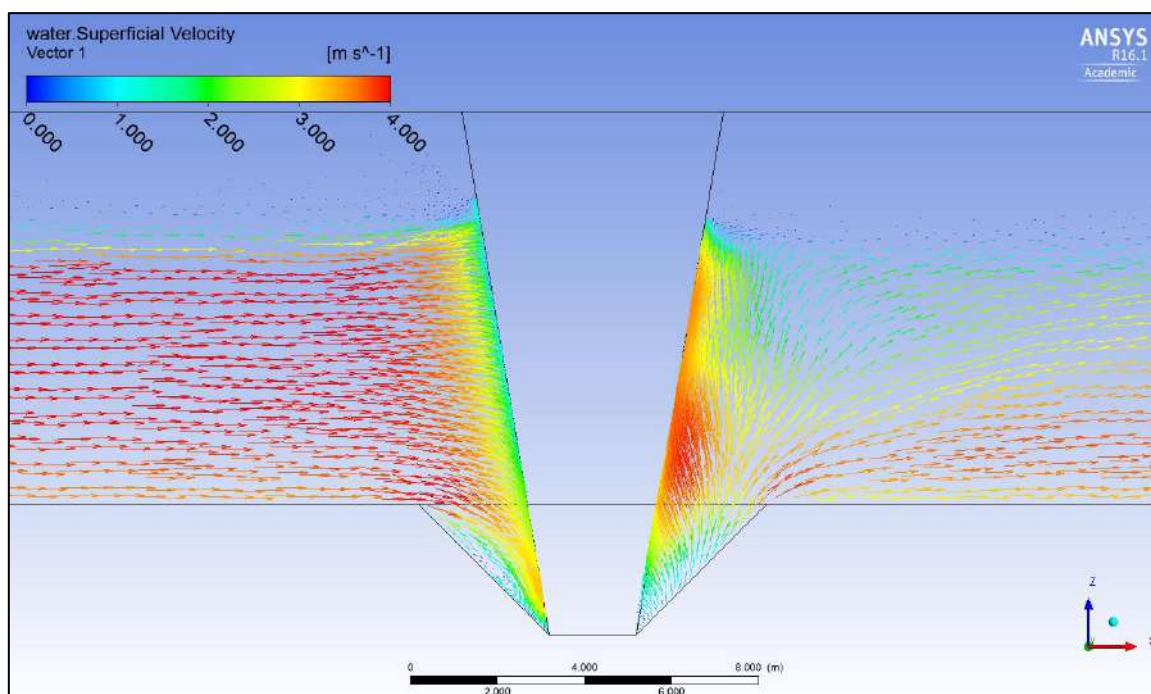


Figura 5. 19 Magnitud y dirección de Vectores velocidad. PAB en Ensayo sin foso de socavación

Elaboración: Propia

5.2.2 PAA

Isosurface

En la Figura 5. 20, Figura 5.21, Figura 5.22 se visualiza la interfaz de superficie del agua alrededor del pilar.

Se puede observar una onda en la cara del pilar aguas arriba, esto se produce porque el flujo impacta con la cara del pilar generando un flujo ascendente hacia la superficie que eleva el nivel del agua.

El tirante en la cara aguas arriba del pilar es mayor que el tirante en la cara aguas abajo del pilar, esto se produce porque la pendiente energética aumenta y el tirante decrece.

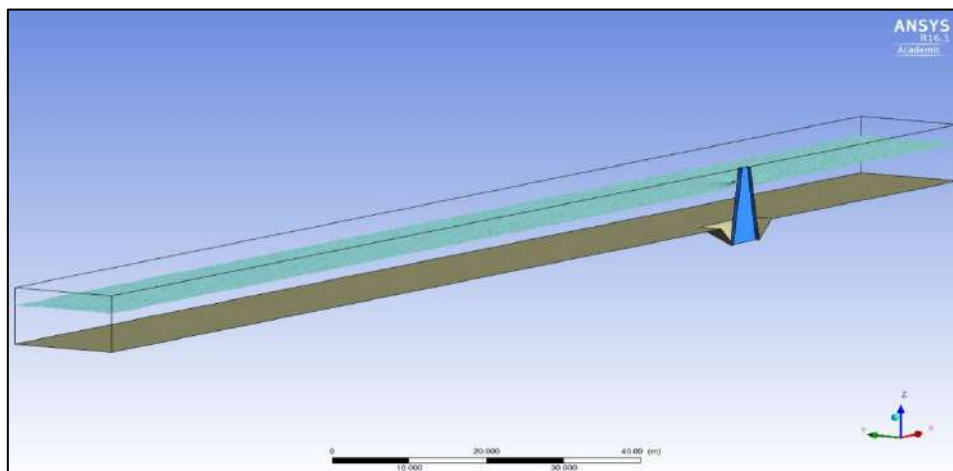


Figura 5. 20 Superficie libre.PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

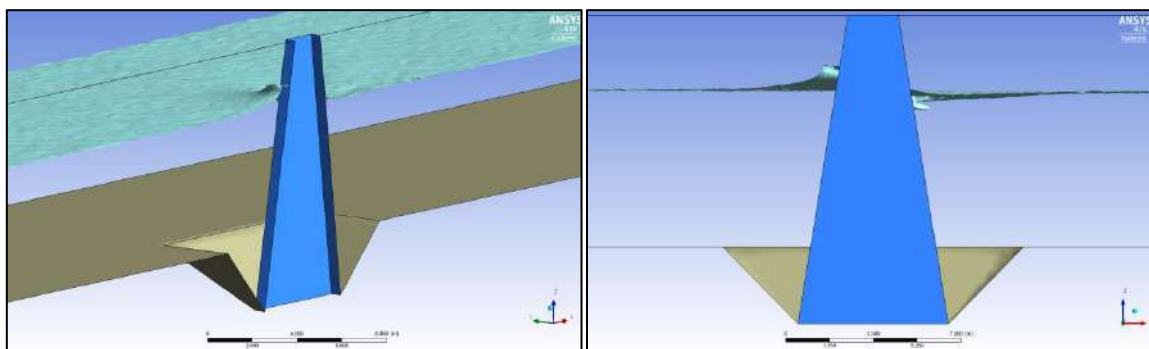


Figura 5. 21 Superficie libre.PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

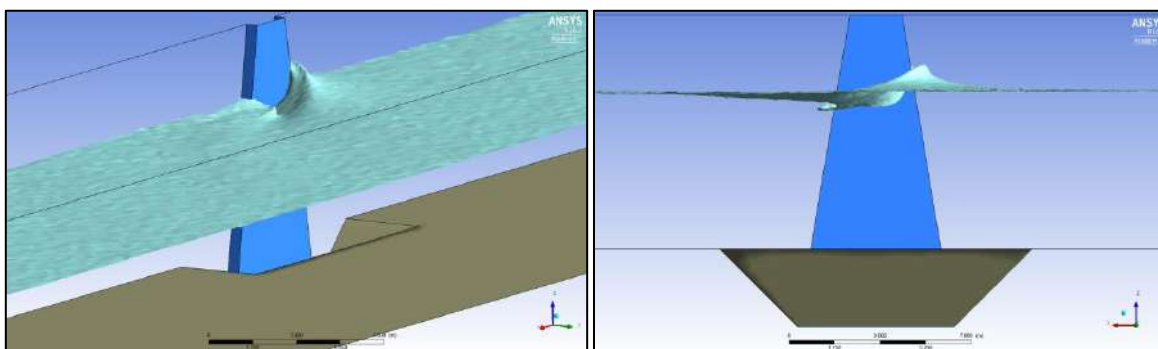


Figura 5. 22 Superficie libre.PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

Contours

En la Figura 5. 23 y Figura 5. 24 se visualiza la magnitud de la velocidad en todo el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Aguas arriba se observa que la velocidad disminuye al acercarse a la cara del pilar. Se aprecia que la velocidad fuera del foso de socavación es uniforme en la cara del pilar y los valores no son similares a cero. A diferencia del caso anterior, en la región inclinada del cauce dentro del foso se aprecia una mayor zona de velocidades con valores cercanos a cero. En la región de ingreso al foso se observa una zona de velocidades altas; se deduce que el foso seguirá amplificándose. Se muestra en la cara del pilar dentro del foso una zona de velocidades altas, que a diferencia del caso anterior son menos intensas. Aguas abajo se aprecia una zona de velocidades altas en la cara del pilar, que a diferencia del caso anterior son menos intensas. Se observa en la región de salida del foso de socavación una región de velocidades altas; se deduce que el foso seguirá amplificándose.

En el Anexo B se pueden visualizar los valores extraídos de velocidad aguas arriba y aguas debajo de la estructura.

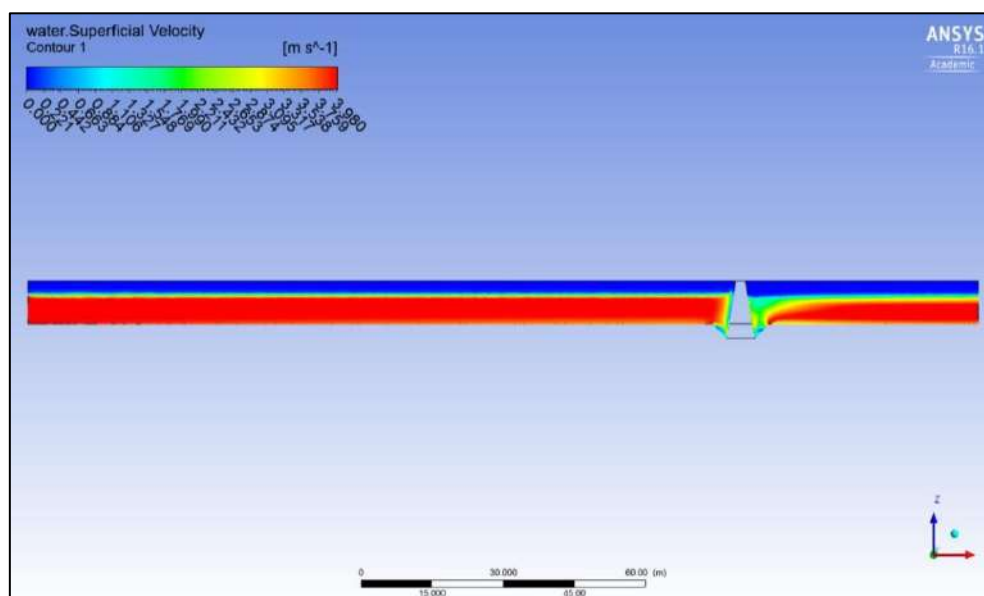


Figura 5. 23 Magnitud de velocidad en el eje. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

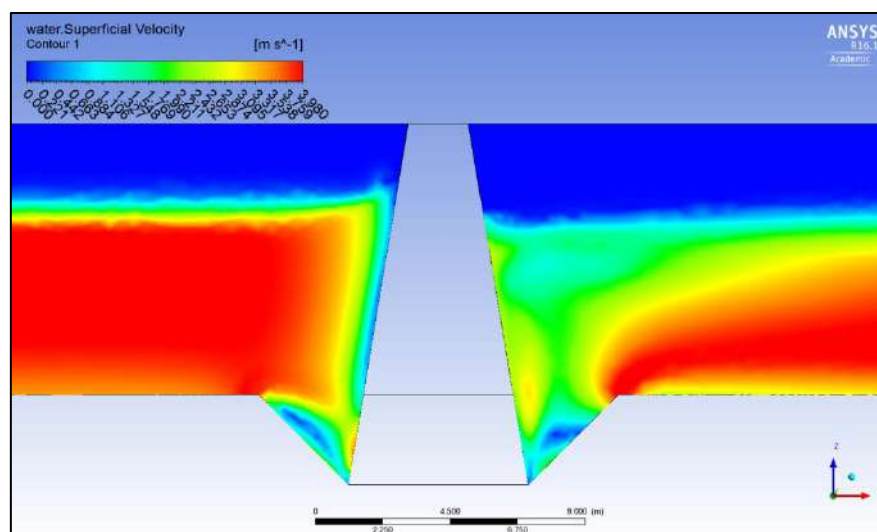


Figura 5. 24 Magnitud de velocidad en el eje. PAA en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

Vector

En la Figura 5. 25 se muestran la dirección y magnitud de la velocidad del flujo en el eje. En escala de colores, la magnitud aumenta del azul al rojo.

Aguas arriba se observa el choque entre las líneas del flujo y el pilar. Fuera del foso de socavación, las líneas tienden ir hacia arriba, aquello puede ser ocasionado por la geometría del pilar. Se aprecia que las líneas paralelas al cauce fuera del foso no siguen la misma trayectoria paralela cuando ingresan a aquel. Dentro del foso se aprecia la trayectoria del vórtice de herradura. En la superficie y en la región próxima a aquella, se observa que las líneas tienden ir hacia arriba al acercarse a la cara del pilar; se deduce que es producto de la trayectoria ascendente del flujo al chocar con la estructura.

Aguas abajo se observa la zona de vórtices. Las líneas no siguen una trayectoria definida. Se aprecia una zona más densa en la cara del pilar

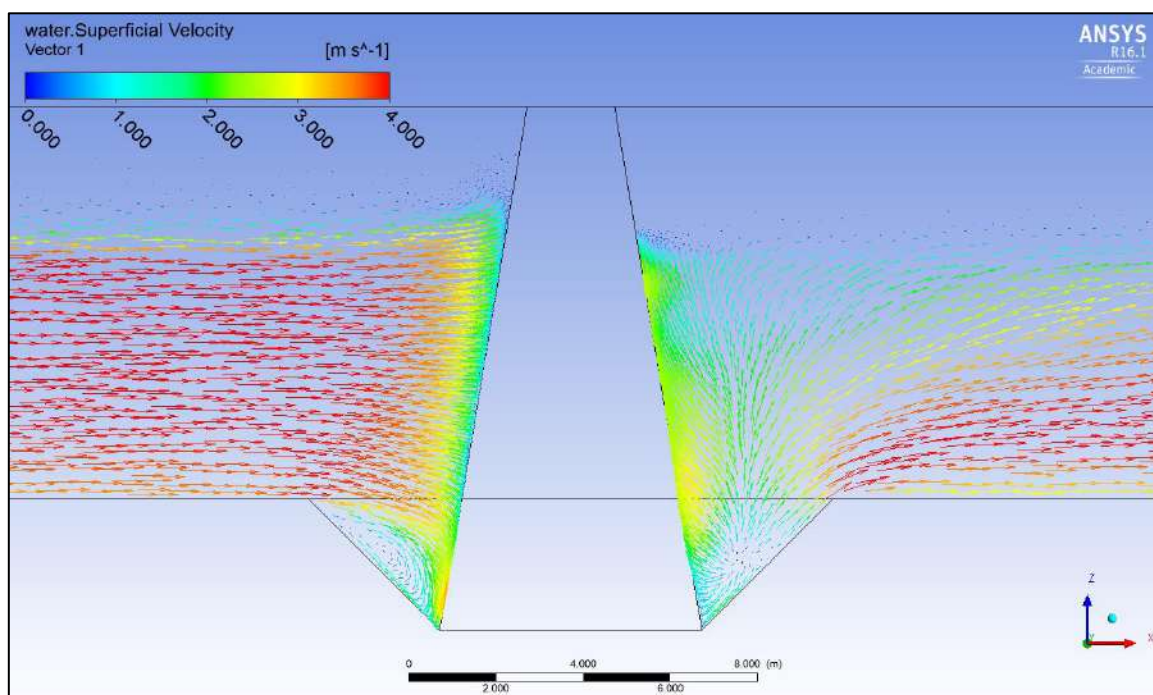


Figura 5. 25 Magnitud y dirección de Vectores velocidad. PAA en Ensayo con foso de socavación

Elaboración: Propia

5.3 Comparación en puntos críticos

Se compararán los valores de velocidad cerca de la cara aguas arriba del pilar con PAB y PAA; se considera una zona de interés para poder evaluar el efecto de la geometría en la erosión del cauce.

Los puntos críticos se ubicarán en el eje de coordenadas XZ dentro del plano del eje. El eje de coordenadas es distinto para cada ensayo; en la Figura 5. 26 se muestra para el ensayo sin foso de socavación y en la Figura 5. 27 se muestra para el ensayo con foso de socavación. La ordenada Z es la misma para el pilar con PAB y PAA en cada ensayo; varía la abscisa X.

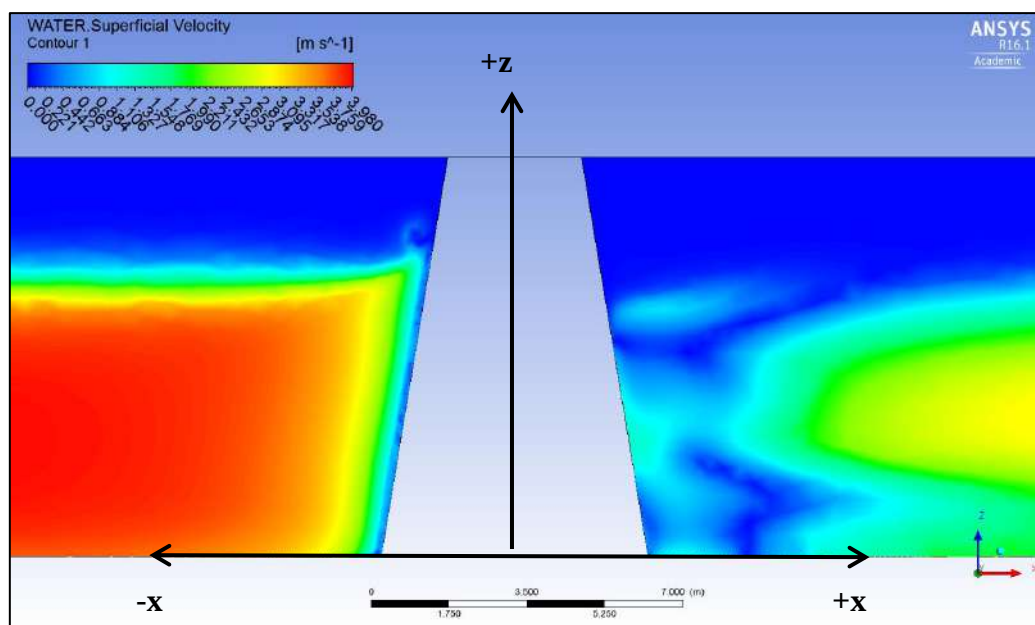


Figura 5. 26 Eje de coordenadas en Ensayo sin foso de socavación
Elaboración: Propia

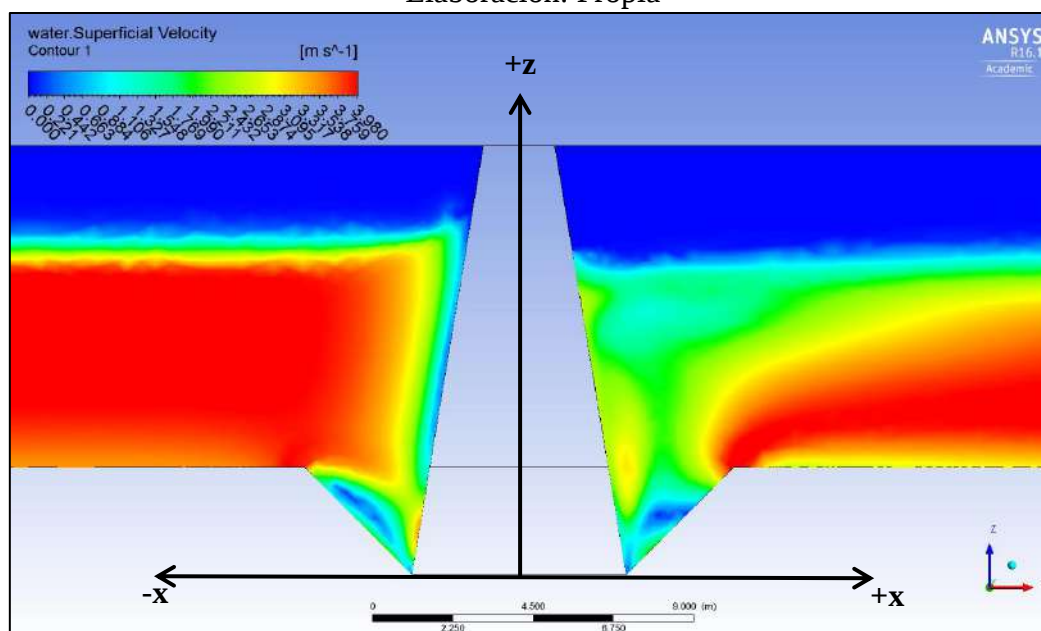


Figura 5. 27 Eje de coordenadas en Ensayo con foso de socavación
Elaboración: Propia

5.3.1 Ensayo sin foso de socavación

En la Tabla 5. se presentan los valores de velocidad cerca de la cara aguas arriba del pilar con PAB y PAA. En el Gráfico 5. 1 se observa que las velocidades en todos los puntos críticos son mayores en PAB que en el pilar con PAA.

Tabla 5. 1 Comparación de valores velocidad entre cara de PAB y PAA en Ensayo sin foso de socavación

Ubicación	Coordenda Z (m)	Coordena X (m) PAB	Coordena X (m) PAA	Velocidad (m/s) PAB	Velocidad (m/s) PAA
1	0.5	-1.75	-3.09	0.99	0.89

Tabla 5. 1 Comparación de valores velocidad entre cara de PAB y PAA en Ensayo sin foso de socavación (continuación)

Ubicación	Coordenda Z (m)	Coordena X (m) PAB	Coordena X (m) PAA	Velocidad (m/s) PAB	Velocidad (m/s) PAA
2	1	-1.82	-3.00	1.08	0.91
3	2	-2.00	-2.85	1.33	0.88
4	3	-2.15	-2.66	1.41	0.81
5	4	-2.33	-2.50	1.44	0.92
6	5	-2.49	-2.34	1.28	0.79

Elaboración: Propia

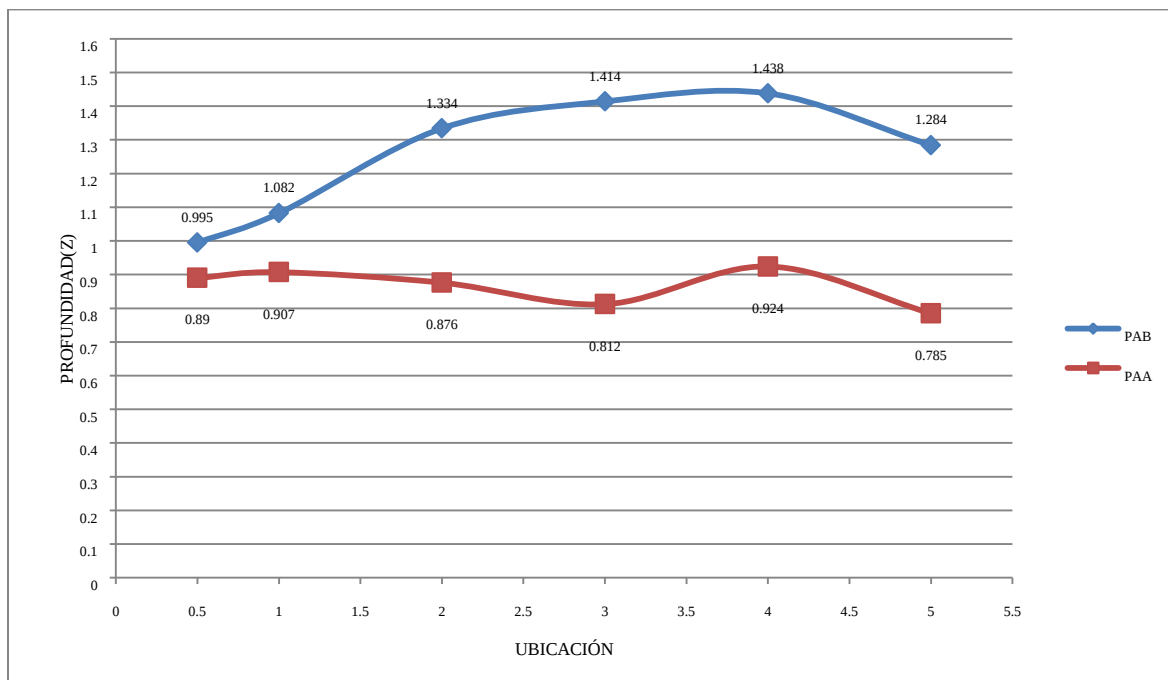


Gráfico 5. 1
Elaboración: Propia

5.3.2 Ensayo con foso de socavación

En la Tabla 5.2 se presentan los valores de velocidad cerca de la cara aguas arriba del pilar con EPA y EPB.

En el Gráfico 5. 2 se observa que las velocidades en todos los puntos críticos son mayores en el pilar con EPB que en el pilar con EPA.

Tabla 5. 2 Comparación de valores velocidad entre cara de PAB y PAA en Ensayo con foso de socavación

Ubicación	Coordenda Z (m)	Coordena X (m) PAB	Coordena X (m) PAA	Velocidad (m/s) PAB	Velocidad (m/s) PAA
1	1.5	-1.57	-3.06	3.06	2.59
2	2.0	-1.65	-3.00	3.14	2.58
3	2.5	1.75	-2.90	2.88	2.24
4	3.0	1.80	-2.80	2.56	1.80

Elaboración: Propia

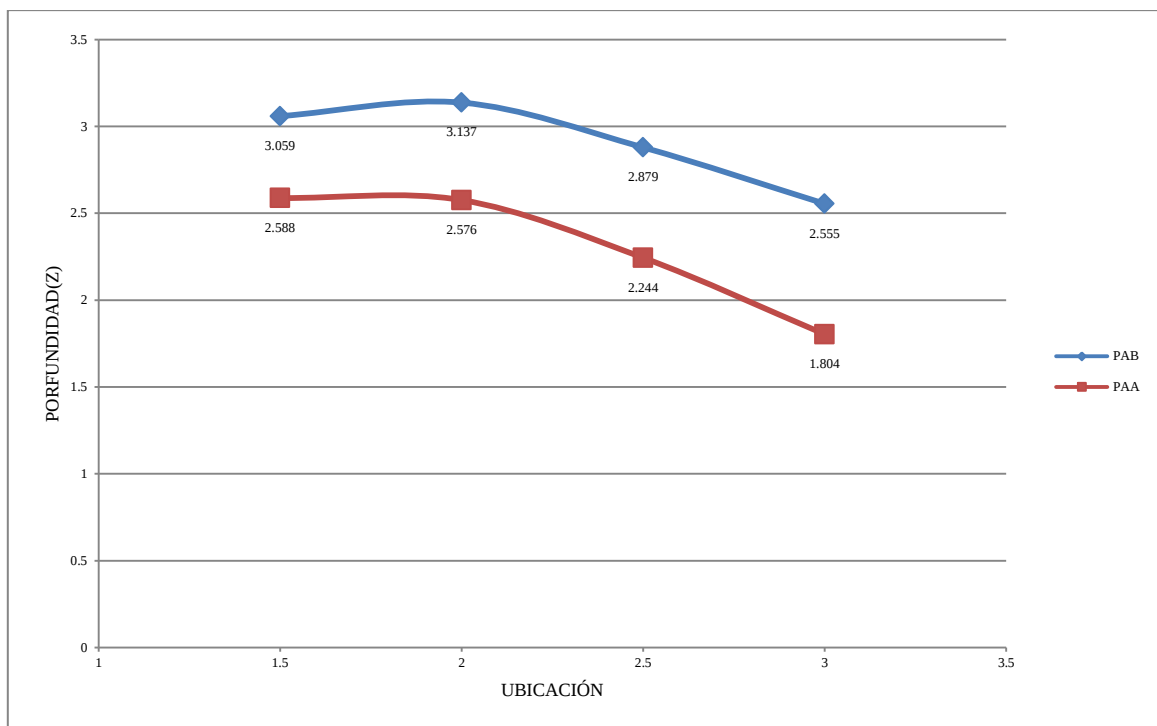


Gráfico 5. 2
Elaboración: Propia

CONCLUSIONES

El modelo numérico logró representar de forma aceptable los resultados del problema. Proporcionó una visualización detallada y amplia información del campo de flujo que a comparación con la dinámica de fluidos analítica y experimental, no se hubiese podido realizar.

Se comprobó que la geometría del pilar angosto en la parte baja genera más socavación, esto se validó, mediante contornos que representaron el campo de magnitudes velocidad y la utilización de vectores que representaron la dirección del flujo.

Se justificó la mayor socavación en el pilar angosto en la parte baja, la cual es producida porque las líneas de corriente aguas arriba que siguen la trayectoria de la geometría del perfil causan una mayor concentración de esfuerzos en el fondo.

Se sugiere no utilizar pilares angostos en la parte alta, sin un análisis físico y numérico, ya que las fórmulas de socavación solo se limitan a pilares uniformes y son deducidas a partir de ensayos de laboratorio para ciertas condiciones. También, se sugiere proteger con enrocado el cauce alrededor del pilar para disminuir la energía cinética producida por el efecto de la líneas de corriente.

Las magnitudes no pueden ser consideradas exactas, ya que esta tesis no es de validación, es decir, no se ha podido corroborar mediante un modelo físico. Sin embargo, en las bases teóricas existentes e investigaciones similares nos permiten deducir que el análisis es el correcto. Además, la persona que hace uso de las técnicas de CFD, necesita aprender cómo analizar correctamente y hacer juicios críticos acerca de los resultados calculados.

Bibliografía

- ANSYS, INC. (2013). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*.
- Breusers, H., & Raudkivi, A. (1991). *Scouring, Hydraulic Structures Design Manual*. Balkema.
- Briceño, M. C. (2003). *El método de índice de erodabilidad en el cálculo de erosión local en pilares de puentes*. Piura : Tesis Universidad de Piura .
- Ferziger, J., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluids Dynamics*. Springer.
- Guo, J., Suaznabar, O., Shan, H., & Shen, J. (2012). *Pier Scour in Clear- Water Conditions with Non-Uniform Bed Materials*. Mc Lean : FHWA.
- HEC-18. (2012). *Evaluating Scour at Bridge*. FHWA.
- Higuera, C., & Perez, G. (1994). *Algunos casos de rehabilitación de puentes fallados por socavación en Colombia*. Cauca: Universidad del Cauca.
- Kessler, M. (2016, Octubre 18). *ESSS*. Retrieved Enero 15, 2017, from <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/10/flujo-turbulento/>
- Malalasekera, W., & Versteeg, H. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The finite volumen method*. Longman Scientific and Technical.
- Maries, Haque, Yilmaz, NiK, & Marai. (n.d.). *Interactive Exploration of Stress Tensors Used in Computational Turbulent Combustion*.
- Melville, B. (2008). *The physics of local scour at bridge piers*. Auckland: Universidad de Auckland.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones . (2016). *Guía para Inspección de puente*.
- Ojeda, J. A. (2003). *Modelación Numérica en Hidráulica*. Retrieved 12 1, 2016, from OoCities.org: <http://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf>
- Özalap, M. C., & Bozkus, Z. (2013). *Experimental Investigation of local scour around bridge pier groups*. Tesis Middle East Technical University.
- SHARCNET. (n.d.). *SHARCNET*. Retrieved Febrero 22, 2017, from https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ai_sinfo/cfx_intro.html
- Yanmaz, A. M. (2002). *Libro Kopru Hidrology*.

ANEXOS

ANEXO A

Resultados en ensayo sin foso de socavación

PAB

Valores velocidad (m/s) en el eje (plano XZ) del pilar

		z						
		0	1	2	3	4	5	6
x	1.5	0.437	x	x	x	x	x	x
	2	1.871	1.075	1.884	x	x	x	x
	2.5	2.401	0.519	0.513	1.553	1.095	0.338	x
	3	2.53	0.896	0.117	1.101	0.808	0.225	0.09
	3.5	2.542	1.078	0.228	0.727	0.622	0.376	0.165
	4	2.438	1.122	0.298	0.445	0.329	0.249	0.329
	5	1.931	0.805	0.558	1.398	1.048	0.179	0.383
	6	1.188	0.654	0.936	2.056	1.929	0.805	0.202
	-1.5	0.718	x	x	x	x	x	x
	-2	1.293	1.608	1.335	x	x	x	x
	-2.5	2.293	2.571	2.443	2.279	1.959	1.275	x
	-3	2.764	3.007	2.981	2.964	2.838	2.421	2.008
	-3.5	3.038	3.256	3.262	3.289	3.235	2.985	2.701
	-4	3.215	3.413	3.436	3.473	3.45	3.289	2.893

A. 1 Valores velocidad (m/s) en el eje (plano XZ) del pilar

PAA

Valores velocidad (m/s) en el eje (plano XZ) del pilar

		z						
		0	1	2	3	4	5	6
x	2.5	x	x	x	x	0.674	0.237	0.119
	3	0.246	0.327	1.04	1.071	0.516	0.309	0.205
	3.5	0.994	0.643	0.782	0.937	0.506	0.301	0.278
	4	1.009	0.643	0.394	0.823	0.421	0.208	0.37
	4.5	0.839	0.481	0.033	0.822	0.387	0.062	0.412
	5	0.409	0.305	0.33	0.998	0.61	0.175	0.368
	5.5	0.311	0.091	0.619	1.259	1.012	0.436	0.293
	6	0.654	0.189	0.919	1.623	1.34	0.673	0.259
	-2.5	x	x	x	x	0.857	1.514	1.961
	-3	0.701	0.907	1.48	2.009	2.415	2.629	2.801
	-3.5	1.791	2.449	2.632	2.846	3.033	3.119	2.989
	-4	2.659	3.053	3.132	3.236	3.334	3.377	2.854
	-4.5	3.031	3.343	3.397	3.453	3.515	3.54	2.724
	-5	3.241	3.511	3.555	3.595	3.636	3.644	2.665
	-5.5	3.379	3.621	3.66	3.689	3.718	3.706	2.431
	-6	3.478	3.696	3.735	3.755	3.775	3.745	2.423

A. 2 Valores velocidad (m/s) en el eje (plano XZ) del pilar

ANEXO B

Resultados en ensayo con foso de socavación

PAB

Valores velocidad (m/s) en el eje (plano XZ) del pilar

		Z																		
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
X	1	0.282	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	1.5	X	X	1.604	2.483	2.852	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	1.594	2.805	3.509	3.766	3.826	3.787	3.732	3.614	X	X	X	X	X	X	X	X
	2.5	X	X	X	X	1.863	2.869	3.493	3.738	3.745	3.683	3.515	3.234	3.021	3.046	3.224	3.352	3.238	2.842	X
	3	X	X	X	X	X	2.464	3.069	3.286	3.258	3.225	3.169	2.998	2.755	2.599	2.661	2.809	2.701	2.093	0.932
	4	X	X	X	X	X	X	4.052	3.693	3.284	3.015	2.865	2.608	2.365	2.052	1.82	1.803	1.842	1.467	0.769
	5	X	X	X	X	X	X	2.763	3.437	3.648	3.287	2.837	2.483	2.124	1.803	1.532	1.479	1.735	1.59	0.531
	-1	0.391	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	-1.5	X	X	2.228	3.167	3.097	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	-2	X	X	X	1.657	2.842	3.14	2.841	2.545	2.239	1.897	1.569	X	X	X	X	X	X	X	X
	-2.5	X	X	X	X	1.599	3.042	3.349	3.162	2.998	2.839	2.667	2.481	2.275	2.05	1.784	1.444	1.046	0.539	X
	-3	X	X	X	X	X	2.211	3.575	3.561	3.433	3.338	3.249	3.168	3.083	2.988	2.881	2.721	2.53	2.291	2.179
	-4	X	X	X	X	X	X	4.281	4.094	3.875	3.784	3.739	3.71	3.681	3.652	3.615	3.572	3.523	3.468	3.202
	-5	X	X	X	X	X	X	3.777	3.829	3.874	3.896	3.909	3.914	3.913	3.909	3.903	3.89	3.876	3.775	2.881

Elaboración: propia

PAA

Valores velocidad (m/s) en el eje (plano XZ) del pilar

		z																	
		0	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
x	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	2.226	2.199	2.372	2.131	1.218	0.406
	2.5	X	X	X	X	X	X	2.565	2.563	2.435	2.368	2.278	2.051	1.743	1.603	1.868	1.877	0.93	0.155
	3	0.335	1.059	1.983	2.638	2.94	3.119	2.999	2.784	2.626	2.424	2.215	1.889	1.613	1.391	1.449	1.597	0.867	0.034
	4	X	X	0.401	0.767	1.472	1.834	1.997	2.066	2.043	2.013	1.958	1.925	1.768	1.452	1.335	1.741	1.133	0.114
	5	X	X	X	X	1.972	2.602	2.816	2.771	2.633	2.509	2.409	2.214	1.96	1.587	1.502	1.731	1.247	0.181
	6	X	X	X	X	X	4.154	3.966	3.661	3.385	3.139	2.876	2.566	2.208	1.803	1.64	1.704	1.268	0.207
	7	X	X	X	X	X	2.962	3.866	4.068	3.808	3.525	3.239	2.905	2.522	2.147	1.899	1.796	1.286	0.398
	-2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.587	0.998	1.37	1.636	1.793	1.847
	-2.5	X	X	X	X	X	X	0.818	0.975	1.238	1.552	1.834	2.079	2.288	2.475	2.604	2.691	2.719	2.698
	-3	0.572	2.87	2.757	2.576	2.447	2.368	2.35	2.434	2.574	2.714	2.835	2.946	3.037	3.105	3.162	3.19	3.189	3.024
	-4	X	X	0.301	1.12	2.707	3.422	3.453	3.436	3.473	3.528	3.569	3.609	3.639	3.658	3.673	3.672	3.591	2.927
	-5	X	X	X	X	0.889	3.288	3.754	3.769	3.797	3.837	3.867	3.889	3.903	3.913	3.92	3.912	3.758	2.599
	-6	X	X	X	X	X	3.885	3.951	3.938	3.958	3.987	4.015	4.035	4.048	4.054	4.048	4.013	3.67	2.593
	-7	X	X	X	X	X	3.726	3.832	3.919	3.992	4.045	4.085	4.111	4.125	4.128	4.119	4.079	3.778	2.477

Elaboración: Propia

Anexo C

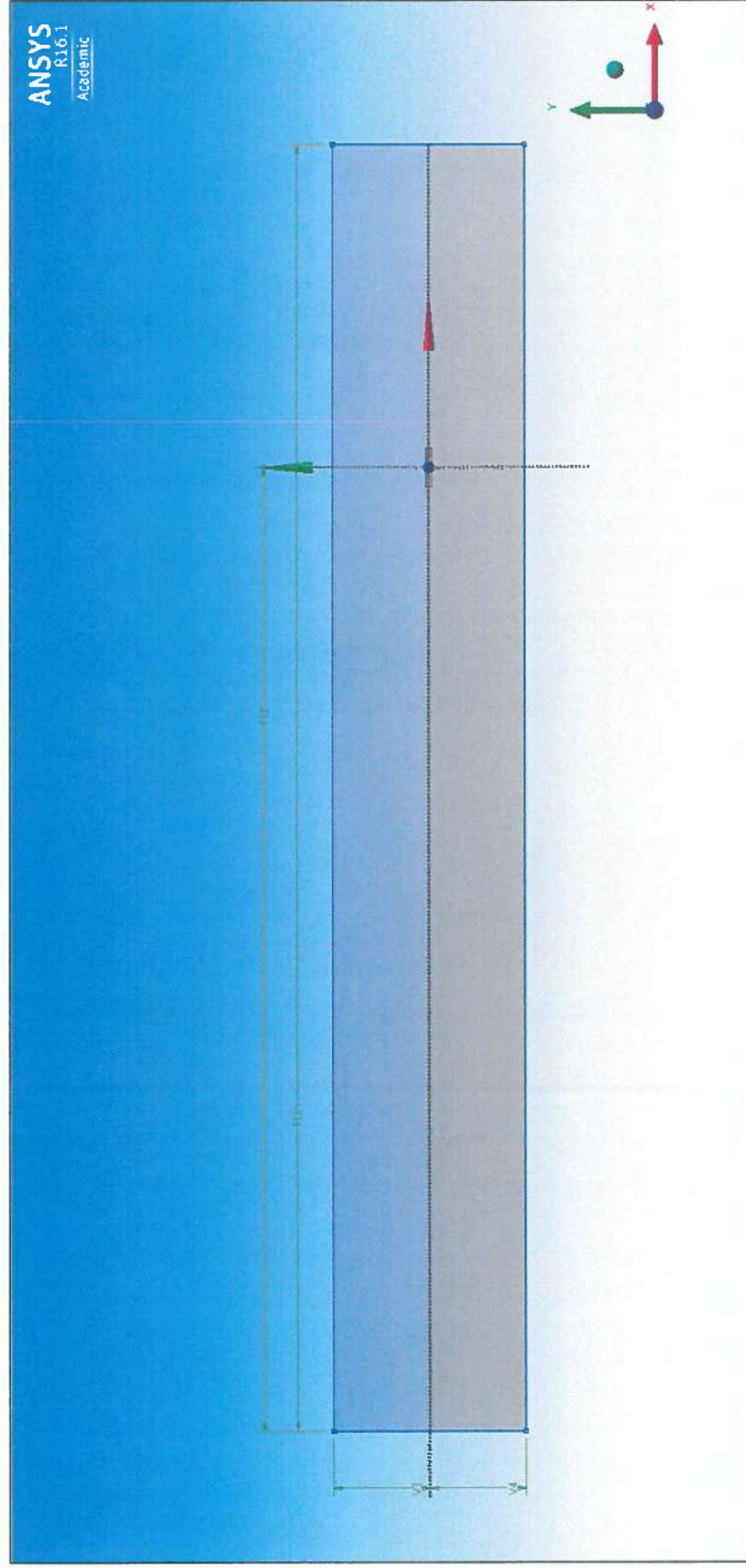
Planos PAB en Ensayo sin foso de socavación

Vista en Elevación del Dominio

V3, V4=15 m

H1=200 m

H2=150 m



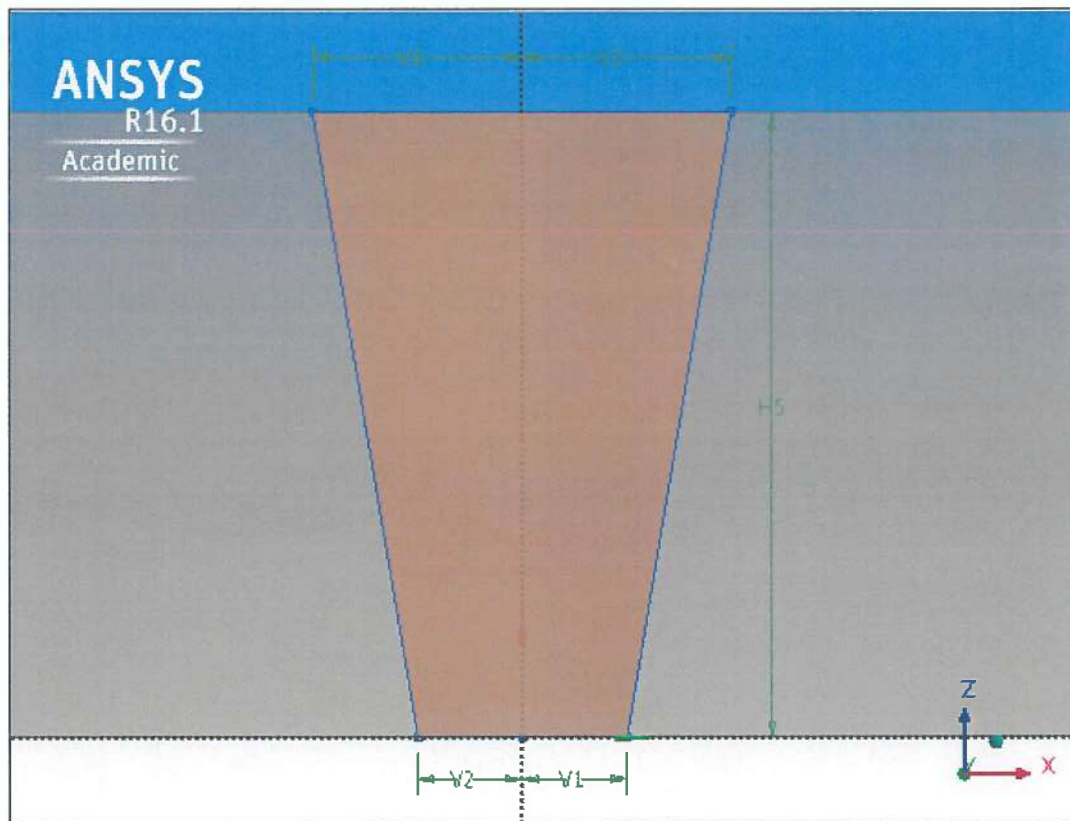
Elaboración: Propia

Vista Frontal del Pilar

$V4, V3 = 3 \text{ m}$

$V2, V1 = 1.5 \text{ m}$

$H5 = 9 \text{ m}$



Elaboración: Propia

Anexo D

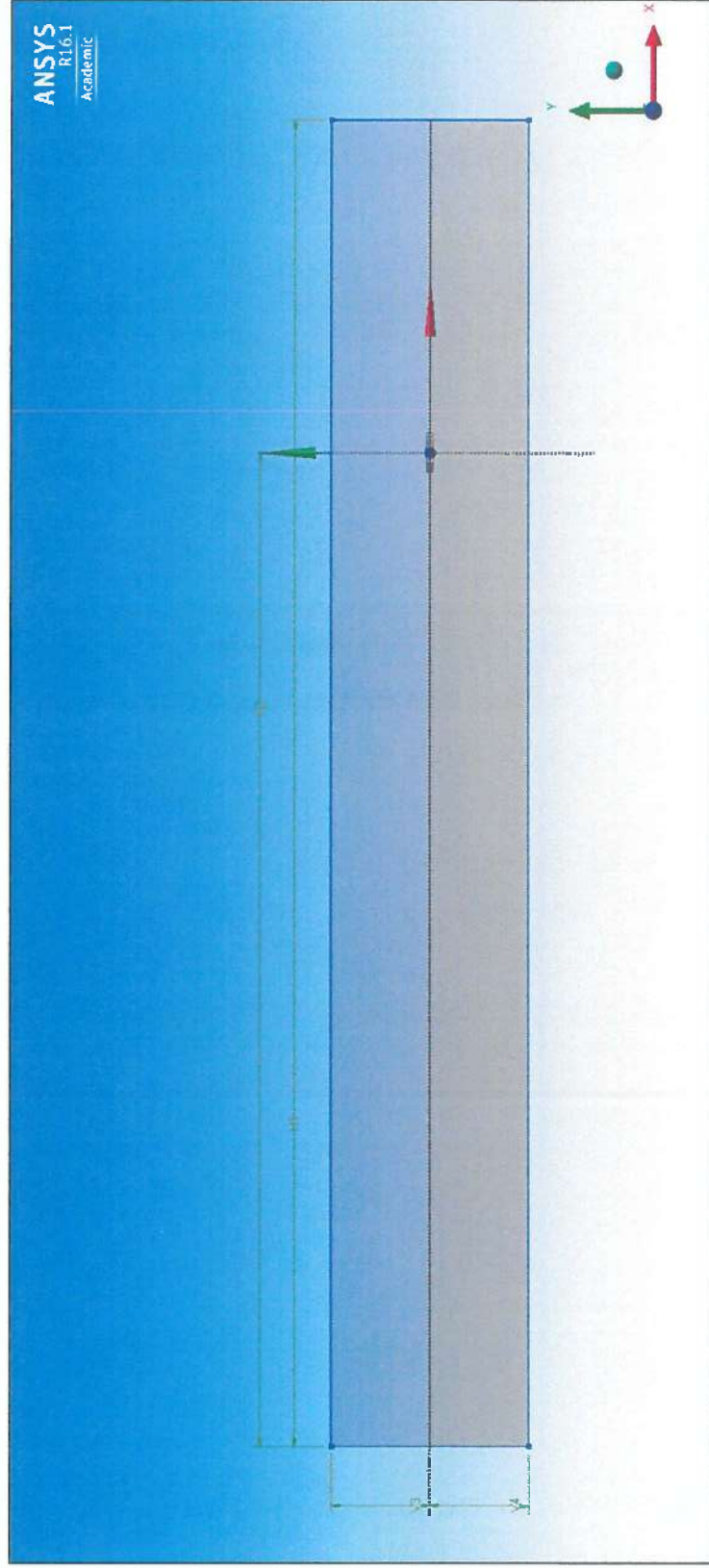
Planos PAA en Ensayo sin foso de socavación

Vista en Elevación del Dominio

V3, V4=15 m

H1=200 m

H2=150 m



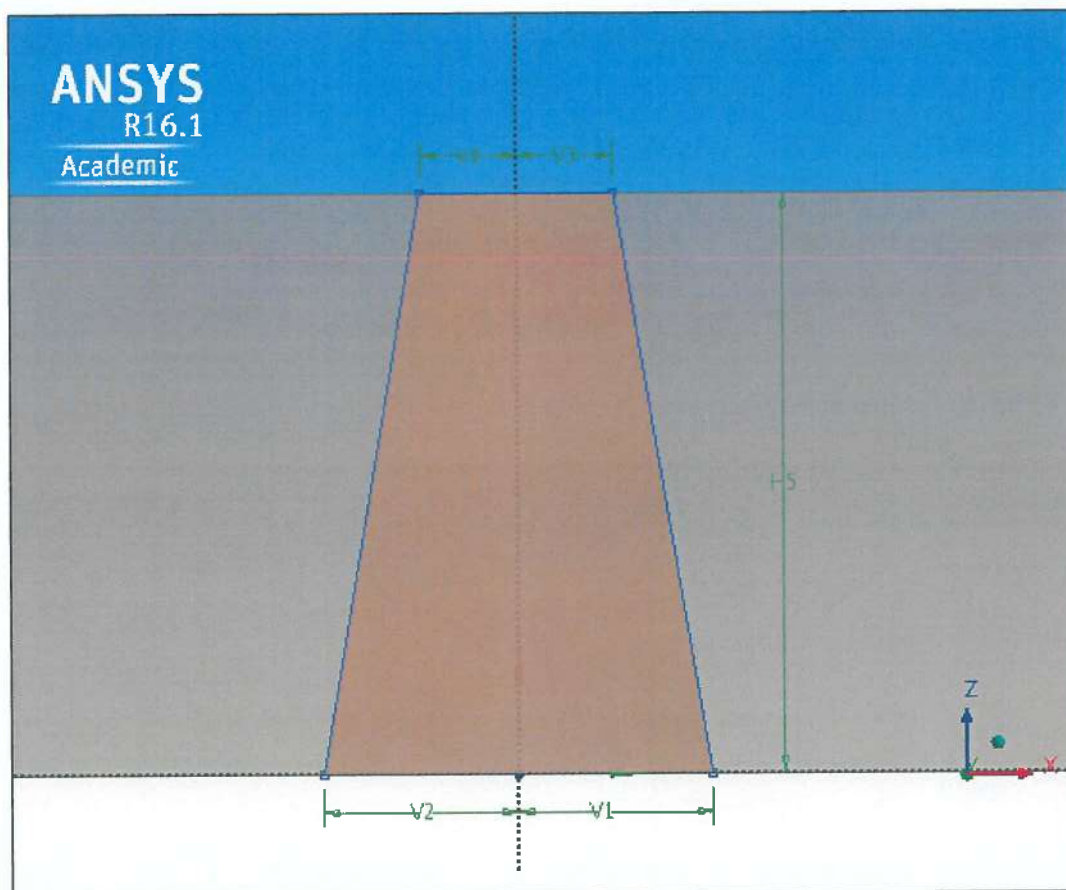
Elaboración: Propla

Vista Frontal del Pilar

$V4, V3 = 3 \text{ m}$

$V2, V1 = 1.5 \text{ m}$

$H5 = 9 \text{ m}$



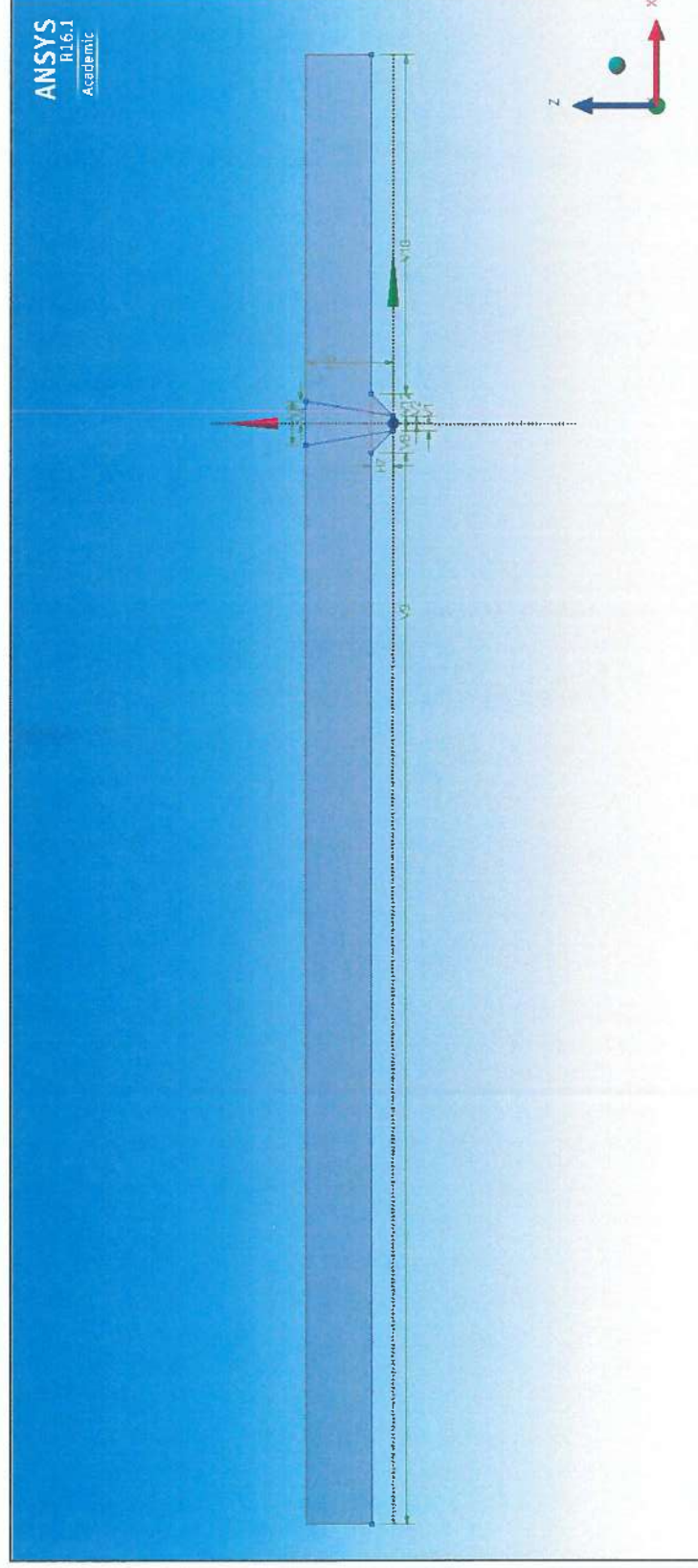
Elaboración: Propla

Anexo E

Planos PAB en Ensayo con foso de socavación

Vista Frontal del Dominio

H5=12, H7=3m.
V1=2m, V2=1m, V3=6m, V4=3m, V10=46m, V12=3m, V8=3m, V9=146m.



Elaboración: Propia

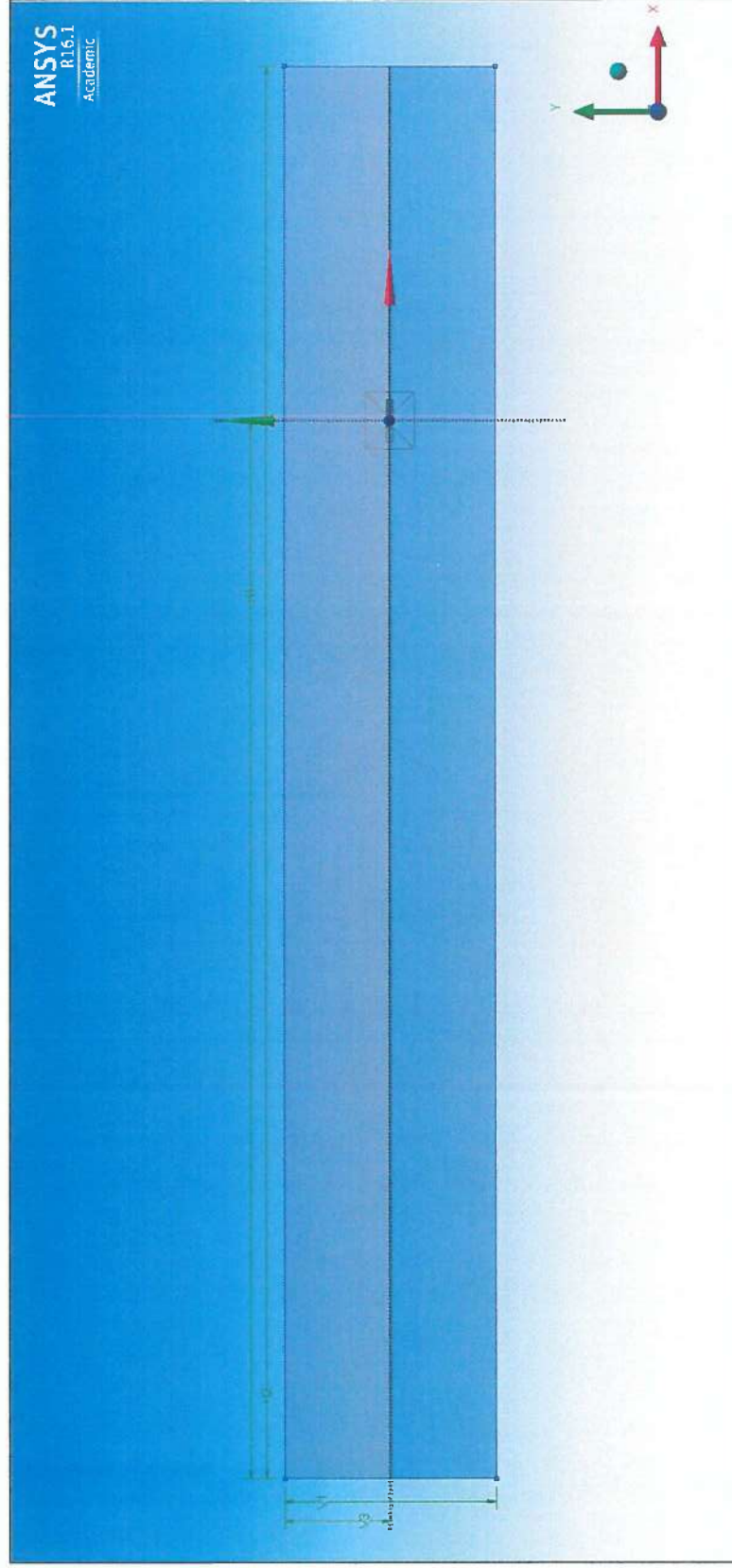
Vista en elevación del Dominio

H2=200 m

H4=150 m

V1=30 m

V3=15 m



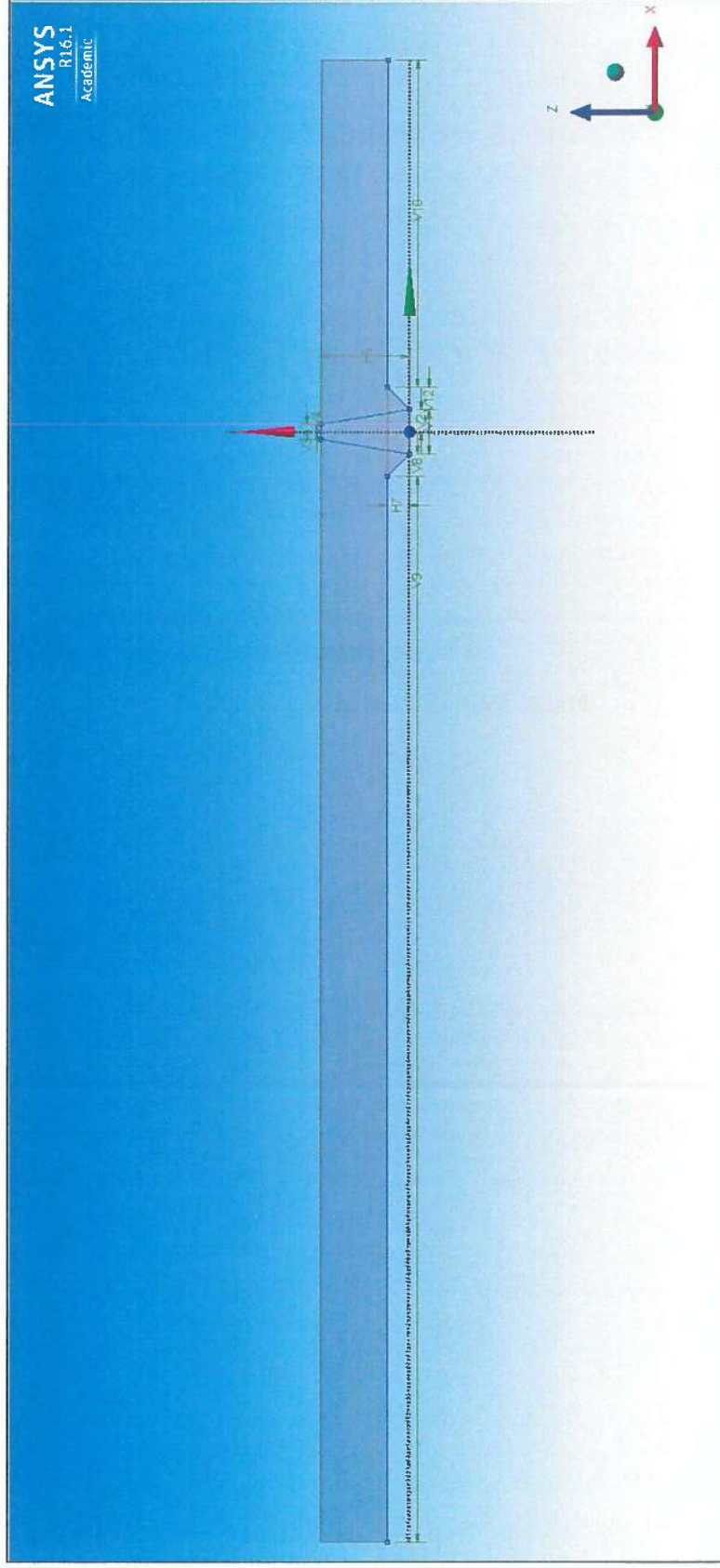
Elaboración: Propia

Anexo F

Planos PAA en Ensayo con foso de socavación

Vista Frontal del Dominio

H5=12m, H7= 3m
V1=6m, V2= 3m, V3= 2m, V4= 1m, V10=44m, V12= 3m, V8= 3m, V9= 144m

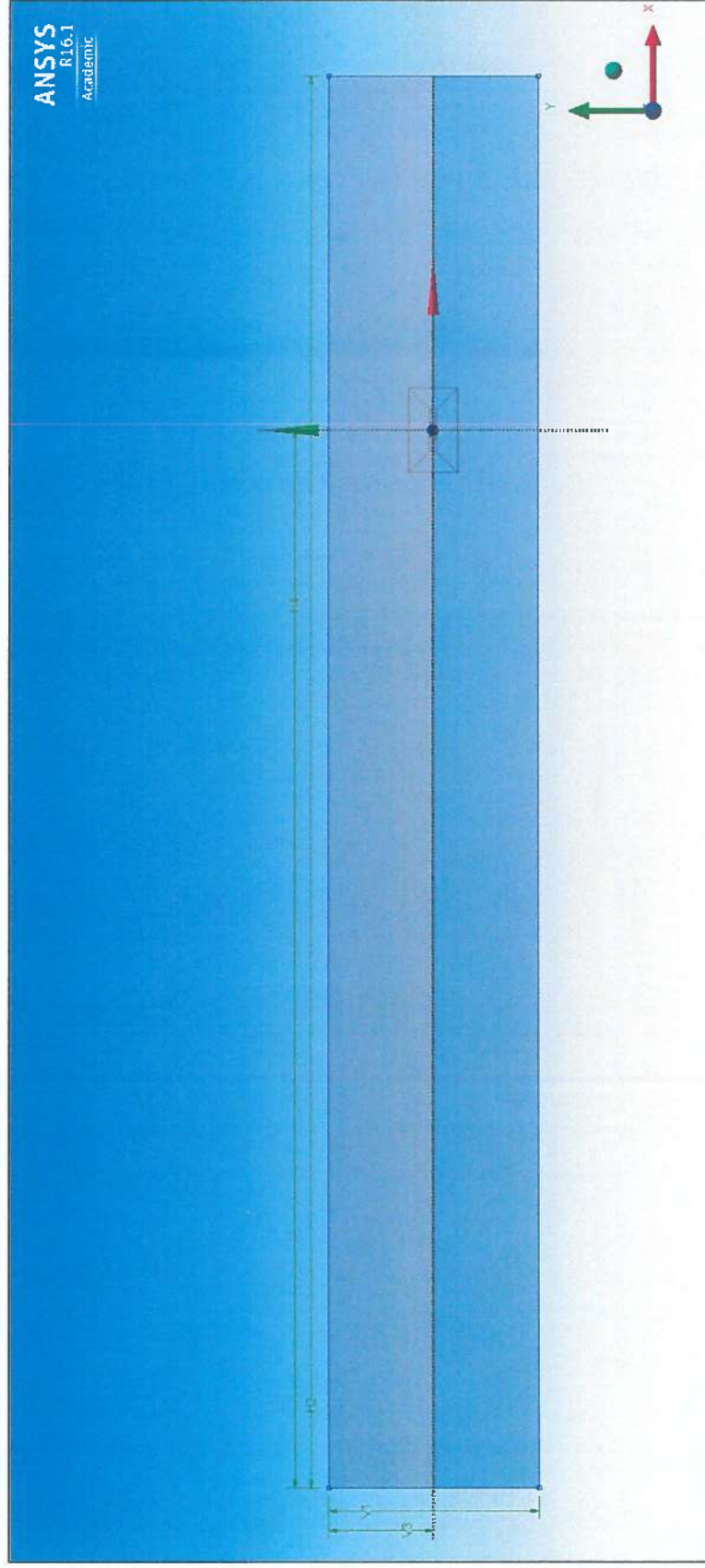


Elaboración: Propia

Vista en elevación del Dominio

H2=200m, H4= 150m

V1=30m, V3= 15m



Elaboración: Propia