

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

SIMULACIÓN DE ESTRUCTURAS SOMETIDAS AL ARRASTRE POR CORRIENTES Y OLEAJE MARINO

APROXIMACIÓN NUMÉRICA DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE DEBIDO AL OLEAJE MARINO SOBRE UNA MONOPILA PARCIALMENTE SUMERGIDA

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

FLORES LEGÑA LUIS MARIO

luis.flores01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. RICARDO PATRICIO ÁLVAREZ BRICEÑO, PhD.

ricardo.alvarez@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. ROBERTO CARLOS ROJAS MOLINA, PhD.

roberto.rojas@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia quienes con su esfuerzo, amor y apoyo me han ayudado a lograr una meta más en mi vida.

Al Inge. Ricardo y al Inge. Roberto, por la guía, paciencia y preocupación que tuvieron para el desarrollo de este trabajo de titulación.

CERTIFICACIONES

Yo, LUIS MARIO FLORES LEGÑA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



LUIS MARIO FLORES LEGÑA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por LUIS MARIO FLORES LEGÑA, bajo mi supervisión.



ING. RICARDO PATRICIO ÁLVAREZ BRICEÑO, PhD
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

LUIS MARIO FLORES LEGÑA

ING. RICARDO PATRICIO ÁLVAREZ BRICEÑO, PhD.

ING. ROBERTO CARLOS ROJAS MOLINA, PhD.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	I
CERTIFICACIONES	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	III
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	1
1.4 Marco teórico	2
Operaciones marinas	2
Estructuras offshore en la industria del petróleo	2
Tipos de plataformas offshore en la industria del petróleo	3
Seguridad estructural en plataformas offshore	8
Campos petroleros offshore en el Ecuador	9
Condiciones de corriente y oleaje de la costa ecuatoriana	11
Fuerzas inducidas por fluidos sobre sólidos sumergidos	13
2 METODOLOGÍA	18
2.1 Configuración para la determinación del arrastre del flujo alrededor de un cilindro en 2D	19
Proceso de Modelado	19
Geometría	19
Malla Computacional	20
Configuraciones para la simulación	22
Solución	26
2.2 Configuración para la determinación del arrastre por oleaje marino sobre un cilindro parcialmente sumergido	26
Proceso de modelado	27
Geometría	27
Malla computacional	27
Configuraciones para la simulación	28
Solución	35
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
3.1 Resultados	36

Datos para determinar el coeficiente de arrastre mediante análisis 2D	36
Resultados del coeficiente de arrastre obtenidos de la simulación 2D	36
Datos de las condiciones de oleaje para determinar el coeficiente de arrastre mediante análisis 3D	38
Resultados obtenidos del coeficiente de arrastre obtenidos de la simulación 3D	39
Estudio paramétrico del coeficiente de arrastre en función de los parámetros de altura sumergida del pilote y velocidad del oleaje	40
3.2 Conclusiones	44
3.3 Recomendaciones	45
4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	47
5 ANEXOS	50

RESUMEN

El presente trabajo muestra el estudio del coeficiente de arrastre para una estructura tipo pilote, semisumergida, que se encuentra sometida al oleaje marino. En primer lugar, se describe mediante una revisión bibliográfica las operaciones marinas para las que se usan las estructuras marinas, sus tipos, la seguridad estructural, el riesgo al que están expuestas y las plataformas que existen en el Ecuador. Se determinan las condiciones de corriente y oleaje de la costa ecuatoriana y se muestra lo relacionado a las fuerzas que ejerce un flujo sobre un cuerpo sumergido.

En la segunda parte, se describe la metodología que se estableció para el desarrollo de la simulación mediante el software ANSYS. Se inició con un análisis 2D para determinar el coeficiente de arrastre para diferentes valores de número de Reynolds, se indica el proceso que se llevó a cabo para la creación del dominio 2D, el mallado, la selección del método de solución, el ingreso de condiciones y el cálculo. Posteriormente, se da paso al análisis en 3D y se determina el coeficiente de arrastre para una estructura semisumergida. Se muestra de igual manera el proceso de simulación en el dominio 3D,

Se verificaron los valores del coeficiente de arrastre en el problema 2D.. Para el análisis 3D, resultados de los coeficientes de arrastre que mostraron que el coeficiente de arrastre aumenta con el porcentaje de columna sumergido y disminuye con la velocidad del oleaje marino.

PALABRAS CLAVE: estructuras marinas, coeficiente de arrastre, oleaje marino, desprendimiento de vórtices.

ABSTRACT

The present work shows the study of the drag coefficient for a pile-type structure, semi-submerged, which is subjected to marine waves. First, a literature review describes the marine operations for which marine structures are used, their types, structural safety, the risk to which they are exposed and the platforms that exist in Ecuador. The current and wave conditions of the Ecuadorian coast are determined and what is related to the forces exerted by a flow on a submerged body is shown.

In the second part, the methodology that was established for the development of the simulation using the ANSYS software is described. It began with a 2D analysis to determine the drag coefficient for different Reynolds number values, indicating the process that was carried out for the creation of the 2D domain, meshing, selection of the solution method, input of conditions and calculation. Subsequently, the 3D analysis is given way and the drag coefficient for a semi-submerged structure is determined. The simulation process in the 3D domain is shown in the same way,

The values of the drag coefficient in the 2D problem were verified. For 3D analysis, results of drag coefficients showed that the drag coefficient increases with the percentage of submerged column and decreases with the speed of marine waves.

KEYWORDS: marine structures, drag coefficient, sea waves, vortex detachment.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Las operaciones marinas, relacionadas con cualquier tipo de industria, deben realizarse guardando los mayores márgenes de seguridad posibles. Para esto, la forma en la cual un fluido genera el arrastre sobre las estructuras marinas (e.g. plataformas) debe ser estudiada. Los dos mecanismos principales mediante los cuales se genera el arrastre del océano sobre las estructuras marinas son: (i) debido a la corriente y (ii) debido al oleaje. La intensidad de las cargas sobre la estructura depende, entre otros factores, de: porción de la estructura sumergida y la forma de la estructura. Como primera aproximación, y debido a que existen diseños para instalación de estructuras a pequeñas profundidades que usan monopilas, se desea estudiar el efecto del oleaje marino sobre un cilindro, el cual estará parcialmente sumergido. La forma de relacionar el momento del líquido y cómo actúa sobre la estructura parcialmente sumergida es el coeficiente de arrastre.

1.1 Objetivo general

Simular una monopila sometida al arrastre por oleaje marino

1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar información bibliográfica.
2. Identificar los modelos matemáticos que representan el problema
3. Resolver el problema mediante herramientas computacionales
4. Relacionar las fuerzas sobre la monopila con los parámetros del fluido mediante el coeficiente de arrastre.

1.3 Alcance

La presente propuesta de Proyecto Integrador tiene como alcance estimar numéricamente el coeficiente de arrastre debido al oleaje. Dentro de las actividades se deberá: entender el problema físico, escoger un software de simulación, representar adecuadamente la cinemática del fluido en cada caso, modelar la interacción fluido-estructura del problema y obtener los coeficientes de arrastre considerando una monopila parcialmente sumergida. El abordaje más adecuado para la resolución de este problema es mediante métodos numéricos o simulación, por lo cual se sugiere el uso de algún software que permita este tipo de trabajo.

1.4 Marco teórico

Operaciones marinas

Las operaciones marinas son, generalmente, operaciones sujetas a peligros potenciales del clima, mareas, equipos marinos y el propio entorno marino, compuesto de sitios de construcción, áreas de muelles, aguas costeras, marinas o submarinas (DNV, 2011). Entre las operaciones marinas típicas se puede citar a: carga y descarga de buques, perforación de pozos, transporte o instalación de objetos y/o embarcaciones. En la Figura 1.1 se muestran ejemplos típicos de operaciones marinas.

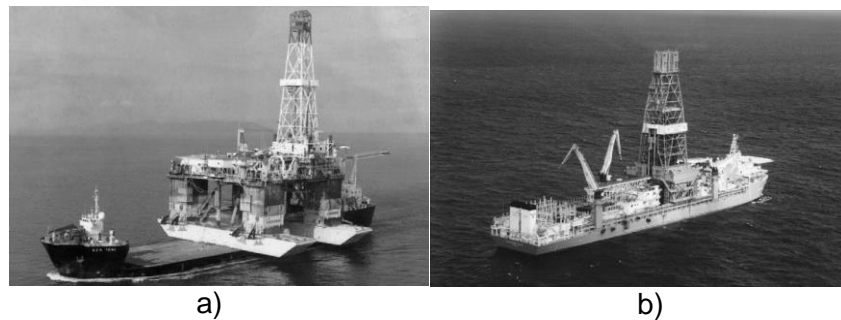


Figura 1.1 Ejemplos de operaciones marinas: a) buque de perforación, b) buque transportando plataforma semi-sumergible
(Fuente: Baker, 2004)

Estructuras offshore en la industria del petróleo

Las plataformas petrolíferas offshore son estructuras situadas en el mar, donde se pueden acomodar diferentes instalaciones y equipos para perforar, extraer y procesar petróleo y gases naturales (Fu, 2018). Estas plataformas están principalmente conformadas por: patas, cubierta, torre, y grúas, tal y como se muestra en la Figura 1.2.

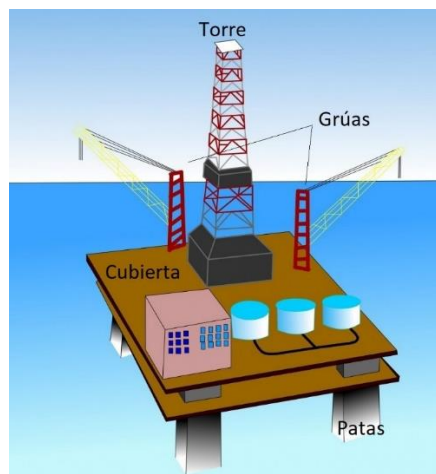


Figura 1.2 Elementos comunes en una plataforma offshore
(Fuente: Kanchwala, 2021)

Las estructuras offshore están en contacto directo con el ambiente marino. Por lo tanto, están sometidas a la acción del oleaje, y condiciones meteorológicas desfavorables que podrían provocar fallos, comprometiendo la seguridad de las operaciones. En este sentido, las condiciones ambientales de operación deben ser consideradas para el diseño y cálculo de estas estructuras (Pelayo, 2018).

Tipos de plataformas offshore en la industria del petróleo

Con respecto a la forma en la cual las plataformas son montadas, estas pueden ser flotantes o estar fijas al lecho marino. En el caso de las estructuras fijas, estas son instaladas mediante gravedad o incrustaciones en el lecho marino y están caracterizadas por su apoyo directo al suelo del mar y por ser usadas en profundidades de hasta 300 metros (Ageitos, 2015).

La limitante de este tipo de estructura es que, a medida que su profundidad de instalación aumenta, su inestabilidad también aumenta y para garantizar estabilidad, la base de la estructura debe ser mucho más ancha, lo cual implica grandes costes constructivos ya sea para la cantidad de acero o de hormigón (Ageitos, 2015).

Se diferencian cuatro tipos de estructuras fijas: *jackets*, torres flexibles o *compliant*, auto elevables o *jack-ups* y plataformas de gravedad.

- Jackets

Surgieron para actividades de perforación y para producción de petróleo, comprenden una estructura de revestimiento la cual está constituida por tubos de acero, como una especie de chaqueta (Figura 1.3a).

Además, poseen una estructura enrejada y es fijada al suelo marino mediante pilotes usando varias patas fijas que, generalmente, están en cantidades de 4 a 8 y permiten alcanzar estabilidad en contra de la fuerza de las olas (Ageitos, 2015).

Las estructuras tipo *jacket* presentan la ventaja de poder ser construidas en tierra y luego ser transportadas al lugar de emplazamiento evitando así los inconvenientes de su construcción en el mar, se han hecho uso en la explotación de petróleo hasta los 100 metros de profundidad.

- Flexibles o compliant

Las estructuras flexibles constan de características similares al tipo *jacket*, sin embargo, son conocidas como estructuras que ceden ante fuerzas ambientales. Estas estructuras

están conformadas por una torre angosta y flexible que soporta fuerzas laterales a través de oscilaciones (Figura 1.3b).

Con esta configuración se ha logrado incrementar su estabilidad en fondos que superen los 400 metros. Este tipo de estructura ha sido la única que se ha situado en aguas profundas (Ageitos, 2015). Dentro de estas estructuras se pueden mencionar distintos tipos como:

- Estructuras articuladas: La torre y la base se unen por medio de una junta que le permite oscilar.
- Estructuras dóciles: Consta de una torre delgada que permite flexión con las olas.
- Estructuras arriostradas: Se sostienen por un conjunto de tirantes simétricos en las que se apoyan estructuras delgadas.

- **Auto elevables o Jack-ups**

El uso de estas estructuras es casi exclusivo de la industria del petróleo y su fin es realizar la perforación de pozos exploratorios en la plataforma continental en profundidades marítimas de hasta 130 metros y, por tanto, se proyectan para ser desplazadas de la zona de fabricación hasta la de exploración.

Estas estructuras se caracterizan por poseer patas trenzadas ubicadas en los extremos de la estructura, las cuales se clavan en el fondo marino (Figura 1.3c). Una vez que las extremidades se han instalado, la plataforma se eleva sobre estas por encima de la superficie del mar.

La principal ventaja del uso de estas estructuras es que permiten trabajar en fondos blandos pues se les puede dotar de un basamento o cimiento en la parte baja. Por otro lado, posee la desventaja de no ser fácil de remolcar hasta el punto de exploración y de la posibilidad de fallos en los mecanismos de elevación (Ageitos, 2015).

- **Plataformas de gravedad**

Estas plataformas son construidas en su mayoría en hormigón y acero y se fijan en el suelo marino mediante gravedad (Figura 1.3d). No requieren de sistemas adicionales de anclaje. Son usadas comúnmente para producción y almacenamiento de petróleo en regiones del Mar del Norte.

Por tanto, la finalidad de su uso ha sido la producción de petróleo hasta 300 metros de profundidad y, como en el caso de las estructuras *jacket*, se puede descargar el petróleo que se haya producido mediante conductos o por buques acopladas a ella, esto gracias a que se sitúan a distancias cortas de la costa (Ageitos, 2015).

La ventaja de estas plataformas es la facilidad de transporte y su instalación por el contrario tiene como desventaja la poca viabilidad que posee en aguas profundas esto debido al incremento económico, que representa su construcción.

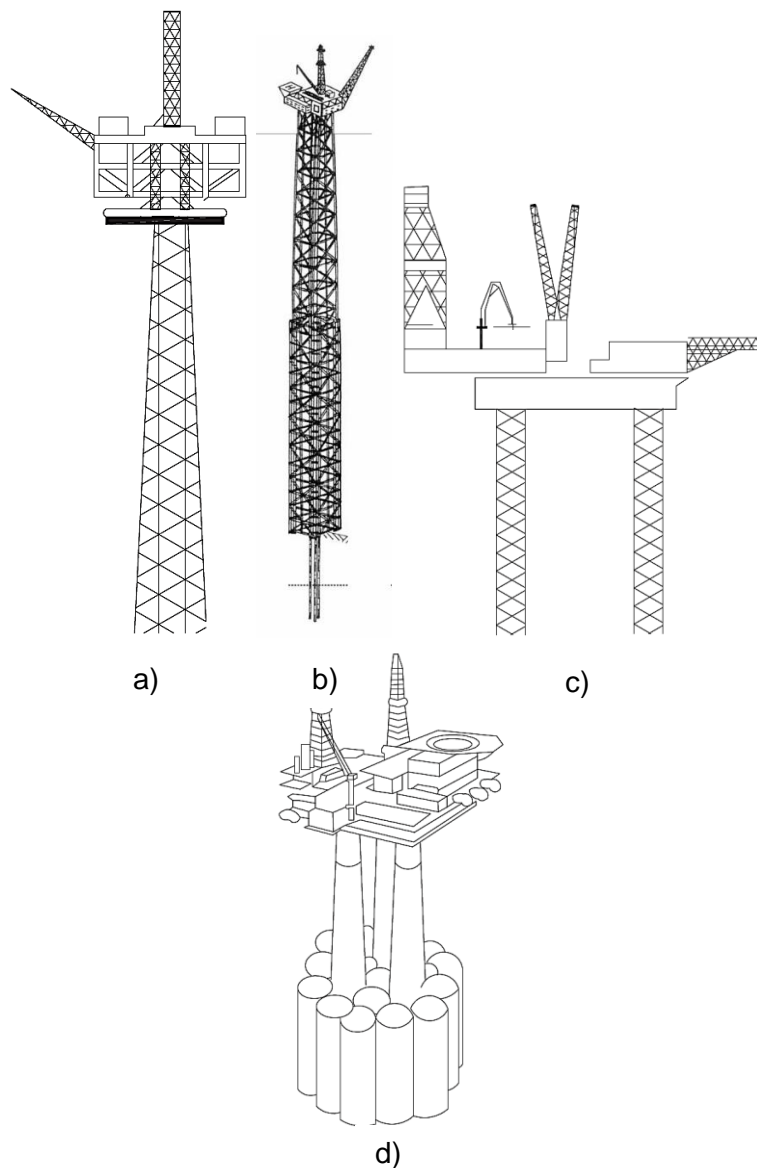


Figura 1.3 Tipos de estructuras offshore fijas: a) Jacket b) Flexible o Compliant c) Auto elevables o Jack-ups d) De gravedad
(Fuente: Fu, 2018; Kosleck & Clauss, 2004)

Por otro lado, las estructuras flotantes surgen debido a la necesidad de extracción de petróleo a profundidades marinas mayores a 1000 metros, son rígidas con grados de libertad en posicionamiento que dependen de la clase de anclaje que se ha utilizado para fijarla al lecho marino.

Al ser del tipo flotante, las ventajas de este tipo de estructura es su capacidad de instalación de aguas profundas y su facilidad de transportación a otras zonas, lo que la hace reutilizable y permite la ejecución más sencilla de las operaciones de desmontaje, lo que es característico en estructuras de perforación (Ageitos, 2015).

Las estructuras flotantes más comunes son: semi-sumergibles, unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga (FPSO), plataformas de patas tensoras (TLP) y plataformas Spar.

- **Semi-sumergibles**

Son estructuras formadas por pontones, columnas y una cubierta (Figura 1.4a), las cuales soportan los equipos de perforación y/o producción principal. Los flotadores que poseen son responsables de gran parte del empuje, lo que garantiza que flote, las columnas dan estabilidad a la estructura. Estas plataformas operan entre profundidades de 60 a 3000 metros.

- **Plataformas de patas tensoras (TLP)**

Corresponden a las siglas Tension Leg Platform, estas estructuras son similares a las semi-sumergibles por el casco que poseen; sin embargo, las TLP como se muestra en la Figura 1.4b están fondeadas por medio de haces de tubos o cables de acero, a los que se les llaman tendones, a su vez son tensados por cilindros hidráulicos alojados en las columnas de la estructura.

Los tendones se encuentran sujetos en un cimiento de hormigón clavado en el fondo marino, conocido como plantilla (Ageitos, 2015). La ventaja de este tipo de plataforma es el buen comportamiento en balanceo y cabeceo, lo que garantiza su estabilidad. Han sido diseñadas para profundidades de 2000 metros.

Por otra parte, su capacidad media-baja de carga limita la tensión de los tirantes y reduce la capacidad de soportar grandes pesos.

- **Unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga (FPSO)**

De las siglas Floating Production, Storage and Offloading units, las plataformas FPSO cumplen la función que su nombre describe y tienen por objetivo el garantizar gran capacidad de almacenamiento logrando así que se instalen en campos alejados de la costa, economizando costos de instalación (Figura 1.4c).

Estas estructuras tienen como ventaja su sistema de anclaje, que permite que la plataforma se posicione dependiendo de las condiciones meteorológicas, lo que lo hace adecuado para zonas con vientos frecuentes (Ageitos, 2015). Estas plataformas operan a una profundidad máxima de 1900 metros.

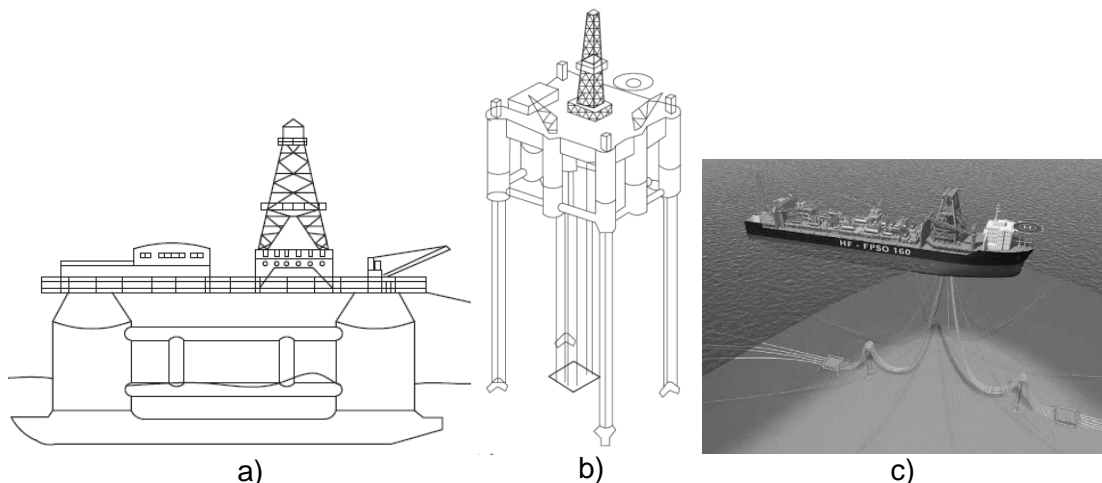


Figura 1.4 Tipos de estructuras offshore flotantes: a) semi-sumergibles, b) Plataformas de patas tensoras (TLP) y c) unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga (FPSO) (Fuente: Fu, 2018)

- **Plataformas Spar**

Las plataformas Spar poseen una estructura tubular de gran diámetro, entre 100 y 250 metros, fijándose en el fondo por medio de amarres tensionados. Su gran estabilidad se debe al calado de la plataforma por lo que el viento, la corriente y las olas no hacen que se desplace significativamente, lo que disminuye los efectos del oleaje y movimientos verticales. Son utilizadas para exploración en profundidades de más de 3000 metros.

En la Figura 1.5 se pueden distinguir 3 tipos: Spar clásica, Truss Spar y Cell Spar, y se describen a continuación:

- **Spar clásica**

Tiene como característica principal su forma de cilindro único vertical compuesto de acero que flexibiliza la capacidad de carga en la cubierta, Figura 1.5a.

- **Truss Spar**

A diferencia del tipo anterior, aquí se sustituye el cilindro de la parte baja de los tanques por una estructura enrejada y por placas horizontales (Figura 1.5b), minimizando los efectos de las olas y los movimientos verticales de la plataforma. El diseño enrejado resulta en una reducción de peso y coste de construcción.

- **Cell Spar.**

Similar al tipo que le precede con la diferencia de que posee varios tubos menores sustituyendo al cilindro único del diseño clásico (Figura 1.5c), este tipo de estructura minimiza el coste de producción de la plataforma.

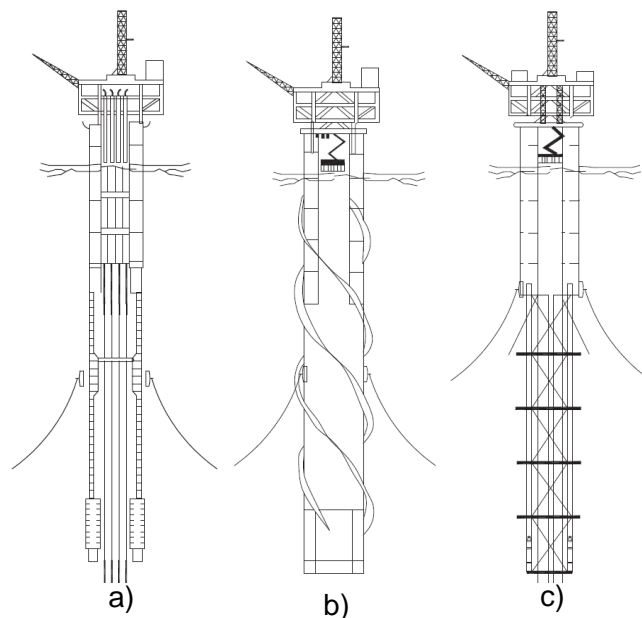


Figura 1.5 Plataformas Spar: a) Spar Clásica, b) Truss Spar y c) Cell Spar
(Fuente: Fu, 2018)

Seguridad estructural en plataformas offshore

Se define como el estudio que se realiza a las estructuras por medio de análisis de varios aspectos que podrían afectar la integridad y estabilidad de las estructuras. El objetivo de este tipo de estudio es evitar que la estructura falle antes de cumplir el tiempo de vida útil. En este contexto, se realizan estudios de los factores de riesgo que permiten conocer la medida de confiabilidad que posee la estructura. (Ageitos, 2015).

Existen varios factores de riesgo que afectan a una estructura que son:

- **Clima extremo:** este factor es aquel que genera cargas de viento, corriente y olas, y son consideradas en el diseño de acuerdo a normas API, RP2A que toman en cuenta la altura de las olas en conjunto con el viento y las condiciones de corriente (Félix, 2011).
- **Siniestros de incendios y explosiones:** se producen por fugas de hidrocarburos y este factor es considerado de alta prioridad, para el control de este tipo de riesgo se debe optar por sistemas de protección contra incendios activos y pasivos (Félix, 2011).
- **Efectos de corrosión:** este riesgo genera disminución del espesor del acero de la estructura, para contrarrestarlo se aplican diferentes métodos de recubrimientos contra la corrosión producida por el contacto con el agua del mar (Félix, 2011).
- **Fatiga:** este riesgo se debe generalmente a las cargas cíclicas del viento y las olas, lo que podrían generar grietas e incluso colapso de la estructura.

Los requerimientos de seguridad en un sistema estructural son verificados mediante métodos descritos en *estándares* y reglas recomendadas por entidades, agencias y organizaciones.

Una de ellas es *Det Norske Veritas* (DNV) que es una entidad encargada de brindar consultorías, asesorías técnicas que establece estándares para barcos y estructuras offshore. Ofrece una lista de estándares y regulaciones, entre las cuales se puede mencionar:

- Reglas para la clasificación de buques.
- Reglas para la clasificación de embarcaciones de alta velocidad, ligeras y navales de superficie.
- Especificaciones del servicio offshore.

Campos petroleros offshore en el Ecuador

En el Ecuador, el campo Amistad es el único productor de hidrocarburos ubicado costa afuera. El campo Amistad se encuentra en el bloque 6 y consta de un área de 2250 Km² aproximadamente (Barzallo & Bermúdez, 2016) y en la parte central del Golfo de Guayaquil, aproximadamente a 100 kilómetros al sur de Guayaquil y 22 km cerca de la costa.

La Figura 1.6 muestra la ubicación geográfica del campo Amistad.

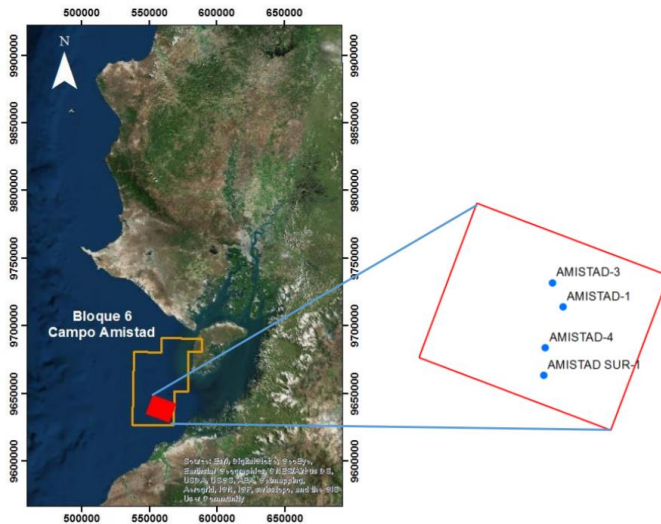


Figura 1.6 Ubicación del campo Amistad
(Fuente: Barzallo & Bermúdez, 2016)

Plataformas existentes en el Campo Amistad

En el campo Amistad se tiene una plataforma para operaciones de perforación y procesamiento AMS A (Plataforma Amistad) con una capacidad de producción de 120 MMPCD (millones de pies cúbicos por día). Además, se encuentran operando 3 plataformas satélites AMS B, AMS C, AMS D; como se muestra en la Figura 1.7 (Castro, 2020).

La plataforma AMS A se encuentra anclada a 132 pies (40 metros) de profundidad con respecto al nivel del mar, con el objetivo de facilitar los enlaces de tubería y el acceso del equipo de perforación de plataforma auto-elevable, el diseño de la misma consta de 6 patas, lo que maximiza la eficacia estructural (Chico & Cuaces, 2016).



Figura 1.7 Plataformas Campo Amistad
(Fuente: PETROAMAZONAS EP, 2018)

El diseño de la plataforma AMS A tipo fija y anclada, permite que sea estable en un sismo de alta intensidad catalogado como “evento raro” evitando una falla catastrófica. Esta plataforma debido a su diseño permite la producción de gas natural, procesar la producción de plataformas satélites o pozos submarinos y/o perforación de pozos nuevos (Chico & Cuaces, 2016).

Las características que posee la plataforma son las siguientes:

- Profundidad – 40 m (132 pies).
- Tipo de plataforma – Plataforma de perforación/producción consta de 6 patas, 4 pilotes y 9 aperturas como se muestra en la Figura 1.8.



Figura 1.8 Plataforma offshore Campo Amistad
(Fuente: Aguirre, 2012)

Condiciones de corriente y oleaje de la costa ecuatoriana

Para el análisis de estructuras sometidas al arrastre es necesario conocer un factor importante acerca del comportamiento de la corriente del mar en la zona costera del Ecuador, que es la medición de la corriente marina. Para la obtención de esta información existe el INOCAR (Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada), que realiza periódicamente estudios oceanográficos en diversos sectores de la franja costera ecuatoriana (Vera et al., 2009).

En el estudio que comprende el Análisis descriptivo de las condiciones del oleaje y corrientes de la costa central del Ecuador, se consideró la franja marina, que se extiende desde la línea costera hasta 1 km mar adentro, por ser el lugar, donde se suele levantar estructuras portuarias (Vera et al., 2009).

Con la información disponible en la base de datos del INOCAR se ha caracterizado los datos de la corriente marina, mostrando lo siguiente:

- En la zona costera de la provincia de Santa Elena y Manabí, se tienen velocidades pequeñas en el rango de 0,2 – 0,5 m/s.
- Isla de La Plata con velocidades máximas de hasta 2 m/s.
- En Galápagos se tienen velocidades menores a 0,5 m/s y como máximo 0,7 m/s.
- En Esmeraldas se tienen velocidades máximas de hasta 2,9 m/s, con promedio de hasta 2 m/s.
- En el Golfo de Guayaquil (zona de ubicación del campo Amistad) cerca de los 12 metros de profundidad se han registrado velocidades promedio durante el flujo de 0.29 a 0.44 m/s y durante el reflujo velocidades promedio que oscilan entre 0.14 a 0.31 m/s.

El fenómeno de la corriente marina consiste en dos estados: flujo y reflujo de las aguas del mar; flujo corresponde al movimiento creciente de la marea que asciende a los litorales de la costa y reflujo al que se produce cuando la marea desciende de las costas y vuelve al mar (Bio Surf Camp, 2022).

El oleaje son un conjunto de perturbaciones producidas en la interfase de dos fluidos, lo que involucra transferencia de energía con muy pocas pérdidas (Pendón, 2017). En el mar las olas se producen por acción del viento y se denominan olas de gravedad, normalmente tienen periodos de pocos a varios segundos, alturas de pocos metros y decena de metros de longitud de onda (Pendón, 2017). A esto es conveniente referirse a una serie de parámetros de la forma ideal sinuosa que se genera en la superficie del mar (interfase agua-aire), se distinguen: cresta, seno, altura, amplitud, longitud y periodo como se muestra en la Figura 1.9.

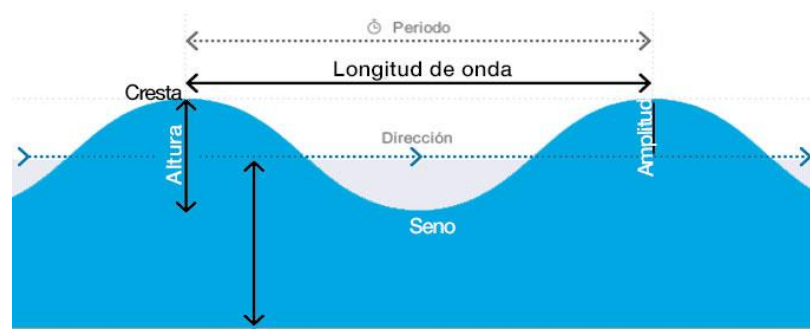


Figura 1.9 Parámetros principales del oleaje según sección paralela al movimiento: amplitud, cresta, seno, altura y longitud de onda.
(Fuente: *masmar*, 2013)

El INOCAR muestra en su portal las condiciones de oleaje en la costa ecuatoriana de principios del año 2022, donde se menciona el arribo de oleajes provenientes del norte y sur del Pacífico hacia las costas ecuatorianas, considerando el parámetro de la altura y el periodo de las olas, de acuerdo a la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Condiciones de oleaje en la costa ecuatoriana

Zona	Altura (m)	Periodo de las olas
Borde costero continental	0,25	16 segundos

Fuente: INOCAR, 2022

Estas condiciones son necesarias para el cálculo de longitud de onda (λ) y velocidad de la ola (v), que más adelante serán necesarias para configurar los ajustes de la simulación.

- Longitud de onda

$$\lambda = \sqrt{gHT}$$

Ecuación 1.1 Longitud de onda
(Fuente:Rodríguez & Chimbo, 2017)

- Velocidad de oleaje

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

Ecuación 1.2 Velocidad del oleaje
(Fuente:Rodríguez & Chimbo, 2017)

Fuerzas inducidas por fluidos sobre solidos sumergidos

Al existir el movimiento relativo en un fluido y un sólido, el sólido experimentara una fuerza neta que desprende factores como la velocidad, el tamaño, la forma y propiedades del fluido y se descompone en fuerza de arrastre (F_D) y fuerza de sustentación (F_L), de acuerdo a la Figura 1.10 (Çengel & Cimbala, 2006).

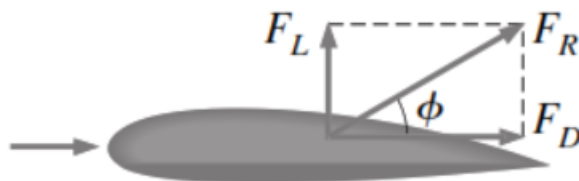


Figura 1.10 Fuerza neta que existe en el movimiento relativo y sus componentes

Fuerzas de arrastre y sustentación

Existen numerosos fenómenos físicos cuando se tiene un movimiento relativo entre un cuerpo y el fluido que lo rodea, a este movimiento se lo conoce como flujo sobre cuerpos o flujo externo, dos fenómenos que se muestran a continuación son: la fuerza de arrastre que ejerce el fluido en dirección del flujo que se debe a los efectos combinados de la presión y fuerzas de fricción y actúa sobre los vehículos, arboles, ductos sumergidos, etc.; y sustentación que son las fuerzas tangenciales y de presión en dirección normal al flujo que normalmente es desarrollada por las alas de los aviones (Çengel & Cimbala, 2006).

Dentro de la mayoría de casos se busca que el arrastre sea eliminado o disminuido, dentro de la reducción del arrastre se tienen algunas ventajas:

- Reducción del consumo de combustible de vehículos.
- Aumento de la seguridad y de la durabilidad en estructuras que se encuentran sometidas a vientos y corrientes marinas fuertes.
- Reducción de vibraciones.

Para representar las características del arrastre y sustentación es conveniente trabajar con parámetros adimensionales adecuados, los parámetros que se mencionan son el coeficiente de arrastre (C_D) y el coeficiente de sustentación (C_L); y se definen como:

- Coeficiente de arrastre C_D :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Ecuación 1.3 Coeficiente de arrastre
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

- Coeficiente de sustentación C_L :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Ecuación 1.4 Coeficiente de sustentación
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

Donde:

V : velocidad de flujo.

F_D : fuerza de arrastre

F_L : Fuerza de sustentación

ρ : densidad del fluido.

A : es el área frontal del cuerpo (área normal a la dirección del flujo). En el caso de un cilindro de diámetro D se tiene que es: $A = LD$

Arrastre debido a Fricción y a Presión

Ya mencionado que el arrastre es debido a efectos de fuerzas de fricción y fuerzas de presión, es conveniente realizar un análisis por separado de cada uno.

El arrastre debido a fricción se debe directamente al esfuerzo de corte, $F_{D,fricción}$.

$$C_{D,fricción} = \frac{F_{D,fricción}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Ecuación 1.5 Coeficiente de arrastre debido a fricción
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

Por otro lado, el arrastre debido a presión tiene una gran dependencia de la forma, por lo que también se lo llama arrastre de forma, $F_{D,presión}$.

El coeficiente arrastre debido a presión se define como:

$$C_{D,presión} = \frac{F_{D,presión}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

Ecuación 1.6 Coeficiente de arrastre debido a presión
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

De ser el caso en el que se hallen los coeficientes o fuerzas de arrastre debido a fricción y debido a presión, el total de los coeficientes o fuerzas se los puede determinar mediante una suma de componentes.

$$C_D = C_{D,fricción} + C_{D,presión}$$

Ecuación 1.7 Coeficiente de arrastre total
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

$$F_D = F_{D,fricción} + F_{D,presión}$$

Ecuación 1.8 Fuerza de arrastre total
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

El coeficiente de arrastre, provocado por los efectos de fricción y presión, suele ser estudiado en función del número de Reynolds. El número de Reynolds representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas y permite determinar el régimen del flujo; si será laminar o turbulento. El número de Reynolds se define como:

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

Ecuación 1.9 Número de Reynolds
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

Donde:

D : dimensión lineal característica de cilindros y esferas.

μ : viscosidad dinámica.

ν : viscosidad cinemática.

Se observa en esta definición que el número de Reynolds es inversamente proporcional a la viscosidad del fluido, como efecto de esto la contribución que tiene el arrastre debido a fricción al arrastre total en cuerpos con facetas o vértices curvas es menor a números de Reynolds altos y llega a ser despreciable a números de Reynolds mayores. El arrastre en el caso de estos cuerpos se debe al arrastre debido a presión.

Coeficiente de arrastre de geometría comunes

El arrastre, aunque es provocado por los efectos de fricción y presión, a menudo es difícil determinarlos por separado, por el contrario, el interés se centra en el arrastre total en la mayoría de los casos y se reporta el coeficiente de arrastre total, el mismo que depende del número de Reynolds, en especial en los casos donde los números de Reynolds están por debajo de aproximadamente 1×10^4 . A valores de números de Reynolds altos los coeficientes de arrastre para la mayoría de geometrías permanece constante (Figura 1.11), esto como consecuencia de que a número de Reynolds altos se vuelve turbulento en su totalidad (Çengel & Cimbala, 2006).

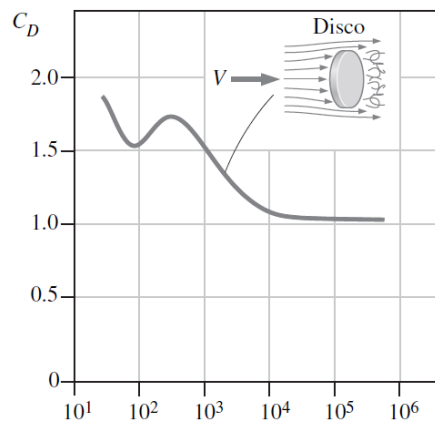


Figura 1.11 Coeficiente de arrastre para un disco.
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

Por esta razón los coeficientes de arrastre son reportados usualmente a flujos de números de Reynolds altos, el comportamiento de C_D , es diferente en regiones bajas o bien llamadas flujos de Stokes, moderada o laminar y alta o turbulenta del número de Reynolds.

Flujos sobre cilindros y esferas

En la práctica el flujo sobre cilindros y esferas se encuentra en un intercambiador de calor de tipo coraza y tubos, en estructuras tubulares expuestas al oleaje donde cuyos pilotes, en general son cilindros verticales como se observa en la Figura 1.12.



Figura 1.12 Estructuras cilíndricas en plataformas Offshore
(Fuente: Galmés, s.f)

Para un cilindro circular o esfera se considera la longitud característica el diámetro externo D , como se muestra en la Ecuación 1.7. El número de Reynolds crítico para flujo a través de un cilindro circular o esfera es más o menos $Re_{cr} \cong 2 \times 10^5$. Es decir, la capa límite permanece laminar para casi $Re \leq 2 \times 10^5$ y se vuelve turbulenta para $Re \geq 2 \times 10^5$ (Çengel & Cimbala, 2006).

El comportamiento del flujo transversal a través de un cilindro muestra patrones de flujo complejos, como se muestra en la Figura 1.13. El fluido al aproximarse al cilindro se ramifica, lo rodea y forma una capa límite de modo que lo envuelve. Las partículas de fluido en el plano medio chocan contra el cilindro a tal punto que detiene al fluido y por tanto en esta zona la presión aumenta, la presión disminuye en dirección del flujo lo que hace que la velocidad del fluido aumente.

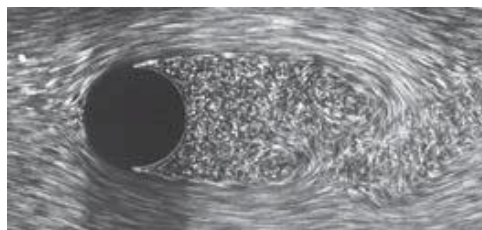


Figura 1.13 Separación de capa límite laminar con estela turbulenta;
flujo sobre un cilindro circular a $Re = 2\ 000$.
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

El flujo transversal sobre cilindros y esferas tienen un comportamiento interesante como se muestra en la Figura 1.14.

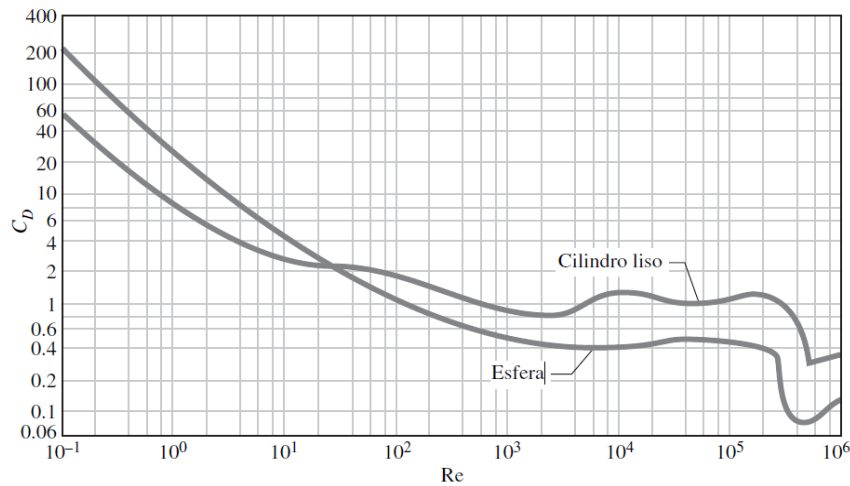


Figura 1.14 Coeficiente de arrastre promedio para flujo transversal sobre un cilindro circular liso y una esfera lisa.
(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

Las curvas muestran distintos comportamientos en diferentes rangos de número de Reynolds que se describen en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 Rangos de Número de Reynolds

Rangos de número de Reynolds	Descripción
$Re \leq 1$	Se tiene flujo de Stokes (flujo laminar)
$Re \cong 90$	La división comienza a ocurrir en la parte subsiguiente del cuerpo con derramamiento de vórtices
$Re = 10^3$	La división aumenta con el aumento del número de Reynolds y el arrastre se debe al arrastre debido a presión.
$10 < Re < 10^3$	En este rango el coeficiente de arrastre continúa bajando con número de Reynolds que crece.
$10^3 < Re < 10^5$	En la capa límite se tiene un flujo laminar, pero el flujo en la región dividida detrás del cilindro es en su totalidad turbulento.

(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

2 METODOLOGÍA

El presente capítulo se muestra en detalle el proceso de modelado para el cálculo de las fuerzas de arrastre que ejerce un flujo sobre un cilindro mediante la herramienta ANSYS

Fluent, que es un *software* que realiza el análisis de problemas de flujo laminar y turbulento mediante el método de volúmenes finitos. Se detalla, en primer lugar, el procedimiento que se realizó para el análisis 2D del flujo alrededor de un cilindro para la obtención del coeficiente de arrastre. Por otra parte, se tiene el procedimiento para crear el dominio 3D del flujo alrededor de un cilindro parcialmente sumergido para la obtención del arrastre para este caso en específico.

2.1 Configuración para la determinación del arrastre del flujo alrededor de un cilindro en 2D

El flujo cruzado sobre un cilindro se ha estudiado ampliamente en ingeniería ya que presenta diversas aplicaciones. En el desarrollo de este problema se pueden observar fenómenos como la separación de capa límite, desprendimiento de vórtices y la transición a la turbulencia, los cuales originan efectos como la fuerza de arrastre, cuyo análisis se puede realizar mediante herramientas computacionales usando métodos finitos en 2D o en 3D. El modelo 3D es el que presenta mayor complejidad, sin embargo, previo a este análisis se propuso el análisis en 2D, cuyos resultados serán verificados de acuerdo a los coeficientes de arrastre que se han mostrado en la literatura. Además de ello se logrará verificar el desprendimiento y formación de vórtices.

Proceso de Modelado

Para esta parte se accedió a ANSYS *Workbench* y se seleccionó el bloque *Fluid Flow (Fluent)*, aquí se debe asegurar que el modelo este configurado para 2D.

Geometría

Se realizó el boceto en la parte de *Design Modeler* y se generó la superficie a partir de los bocetos.

En primer lugar, se sugirió como dominio la superficie mostrada en la Figura 2.1, donde D , representa el diámetro del cilindro y se tomó un valor real de 8 metros. Al realizar este análisis se obtuvieron resultados bastante desfavorables.

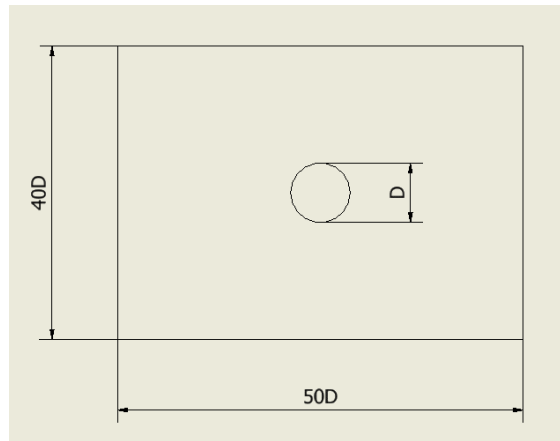


Figura 2.1 Tamaño de dominio sugerido
(Fuente: Propia)

Es por esta razón que se decidió reducir el tamaño del dominio según lo recomendado en (Lausová et al., 2019) y (Sato & Kobayashi, 2012). En estos estudios, se propone un dominio rectangular, donde la base es paralela a la dirección de la velocidad y es mayor que la altura. Además, es importante mencionar que el cilindro no se encuentra en el centro geométrico del dominio.

Las dimensiones del dominio en metros (Figura 2.2) están dadas por: $D_{16}=1$ m, $V_{11}=7,5$ m, $V_{12}=15$ m, $H_{14} = 7,5$ m y $H_{15} = 30$ m.

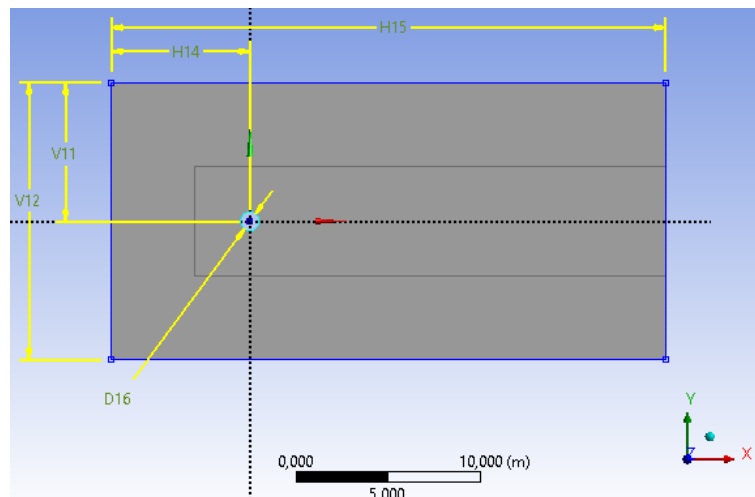


Figura 2.2 Geometría creada
(Fuente: Propia)

Malla Computacional

Con la geometría creada, como se ve en la Figura 2.3, se debe definir las regiones que componen el dominio como son: entrada (*inlet*), salida (*outlet*), paredes (*wall*) y cilindro

(cylinder).

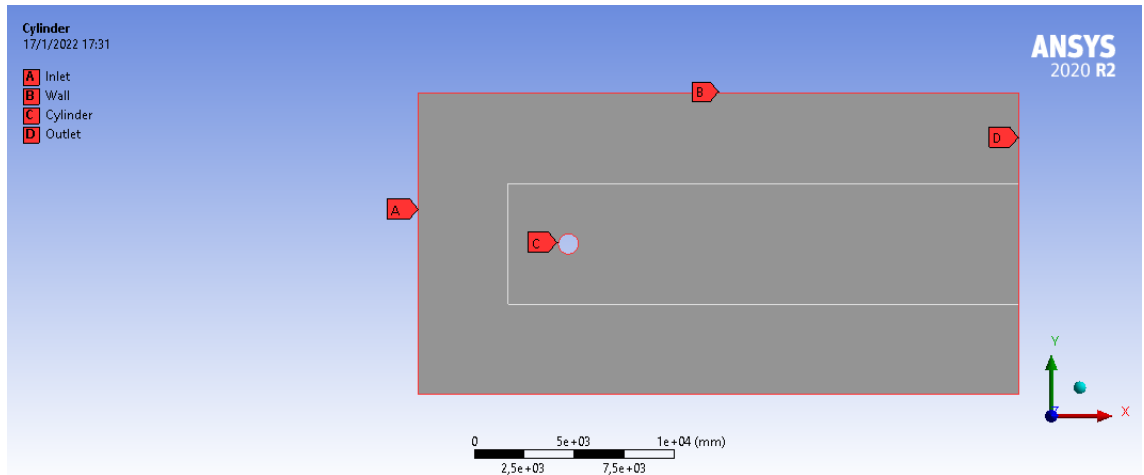


Figura 2.3 Identificación de las zonas del dominio
(Fuente: Propia)

Después de configurar las regiones, se procede con los ajustes de la malla. La realización de una malla depende de las configuraciones que el usuario define. Dentro de estas configuraciones se tiene: tamaño de elementos (*element size*), inflación (*inflation*), combinación de tamaño del cuerpo y borde alrededor del cilindro (*sizing*), entre otras. Al generar el mallado se tiene el resultado mostrado en la Figura 2.4. Este mallado debe ser refinado en los bordes del cilindro, como se ve en la Figura 2.5.

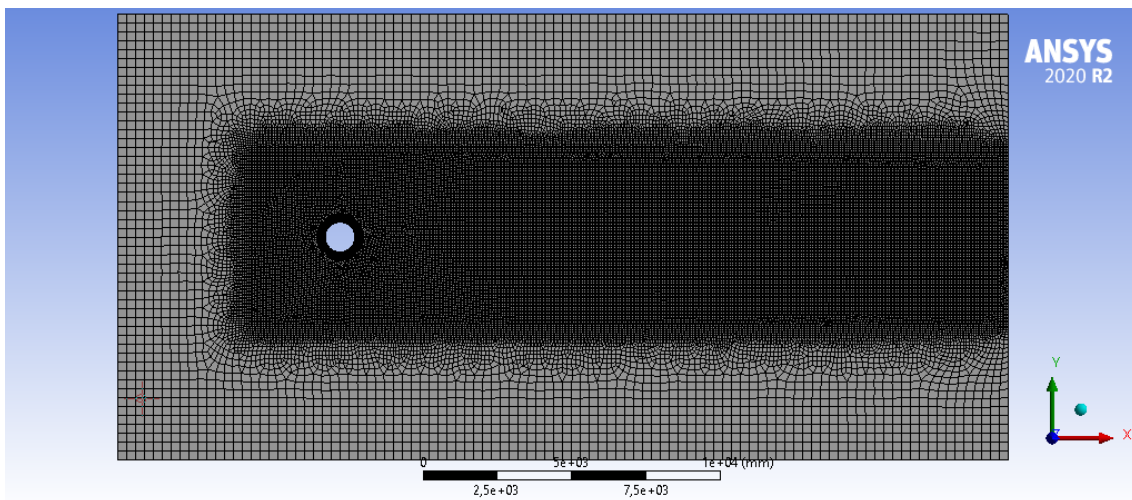


Figura 2.4 Mallado del dominio
(Fuente: Propia)

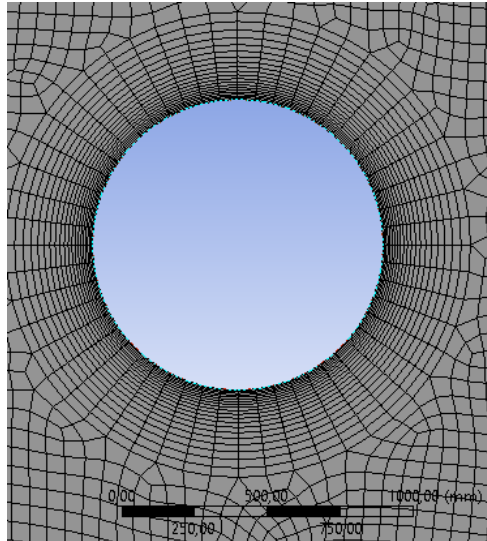


Figura 2.5 Refinamiento alrededor del cilindro
(Fuente: Propia)

Configuraciones para la simulación

En el *Workbench*, se selecciona la pestaña *setup* y aparece la ventana *launcher fluent*. En esta ventana, mostrada en la Figura 2.6, se define la cantidad de procesadores lógicos con los que se desea trabajar y el procesamiento en paralelo. Estas opciones se seleccionan de acuerdo al *hardware* que se posee.

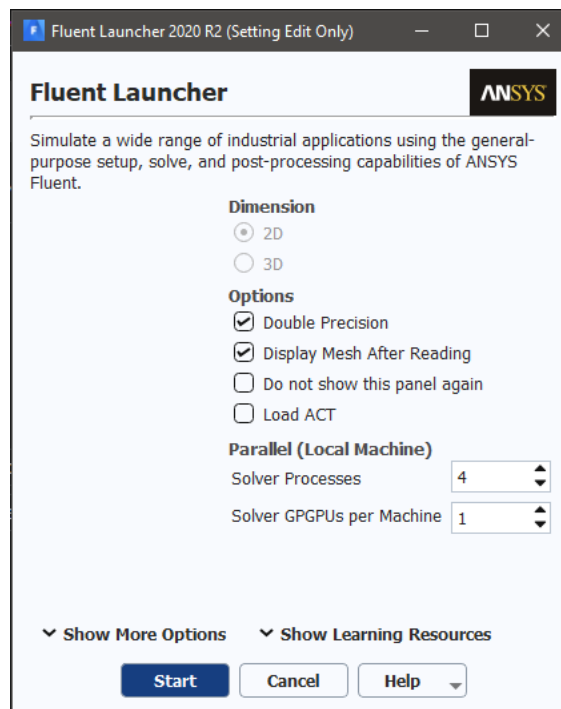


Figura 2.6 Launcher Fluent
(Fuente: Propia)

Al pulsar *start* se presentarán los ajustes que se deben seguir de acuerdo al orden especificado en la Figura 2.7

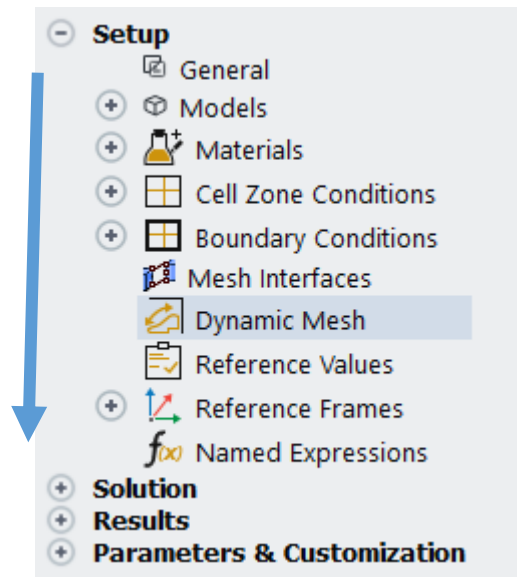


Figura 2.7 Orden de configuración
(Fuente: Propia)

Al seleccionar la opción *general*, al desplazarse se debe escoger las opciones para el *solver* que son: *Pressure-Based* (se considera aquí como abierto a la atmosfera), *velocity: absolute*, *transient* y colocar el valor de la gravedad.

- Selección del modelo

En la selección del modelo (*viscous model*) se puede encontrar varios los cuales se seleccionan de acuerdo al número de Reynolds que determina el régimen del flujo con el que se está trabajando, en el caso de encontrarse en un régimen laminar ($Re \leq 2300$) se tiene el modelo laminar y para el caso de un flujo turbulento $Re \geq 4000$.

Hay varios modelos como se muestra en la Figura 2.8 como son: k-épsilon, k-omega, Transition SST, etc. Donde el modelo k-épsilon produce resultados satisfactorios para propósitos de diseño de ingeniería para casos de flujos de alto número de Reynolds (Bangga, y otros, 2017).

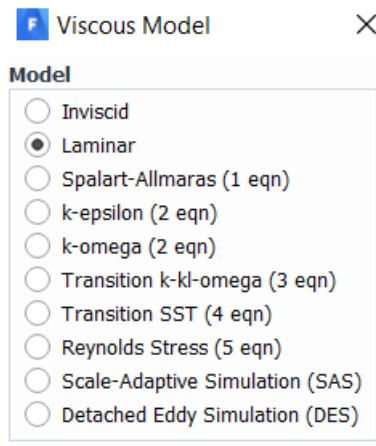


Figura 2.8 Modelos disponibles en ANSYS
(Fuente: Propia)

- **Selección del material**

En esta sección se debe agregar el fluido con el que se va a realizar el análisis, el cual debe estar en la base de datos de ANSYS. Para este caso se ingresa agua líquida.

- **Condiciones de contorno**

En la condición de entrada se ingresa la velocidad que se calcula de acuerdo a la Tabla 3.1. Además, para la condición de salida se toma en cuenta la presión abierta la atmosfera. Para los casos de las paredes laterales, estas deben ser configuradas como simetría (*symmetry*), para indicar que estos sectores del dominio el flujo y las componentes normales de todas las variables son cero.

- **Valores de referencia**

En los valores de referencia se debe ajustar el cálculo desde la entrada, de acuerdo a la Figura 2.9.

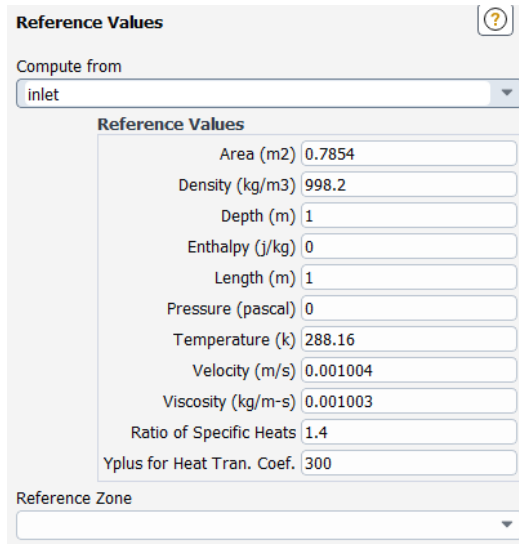


Figura 2.9 Valores de referencia
(Fuente: Propia)

- **Determinación del coeficiente de arrastre**

Para esta sección se seleccionó la parte de *Solutions* → *Report definitions*, se procede a elegir un nuevo reporte determinando el cálculo del coeficiente de arrastre sobre el cilindro, como se ve en la Figura 2.10.

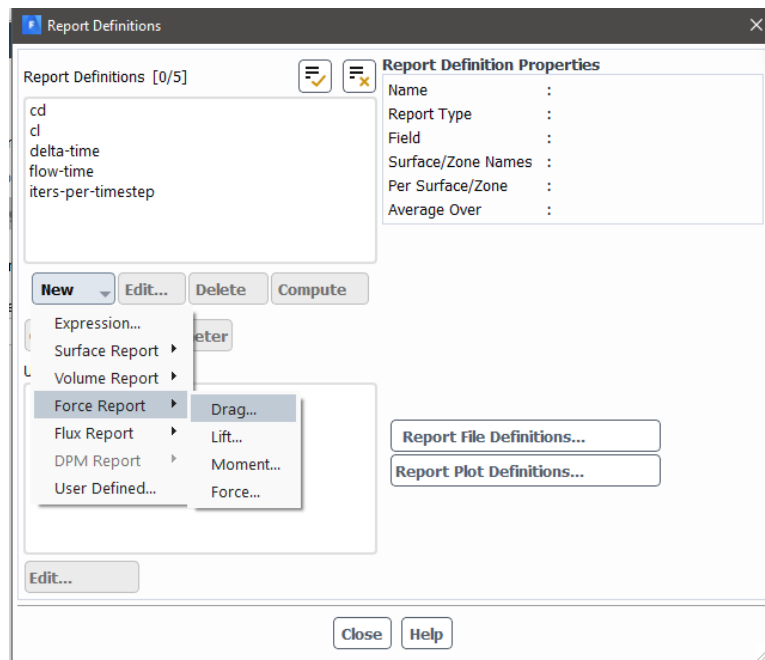


Figura 2.10 Configuración para calcular el coeficiente de arrastre
(Fuente: Propia)

- Inicialización

Se escogió el método standard y con ello dar clic en inicializar, como se observa en la Figura 2.11.

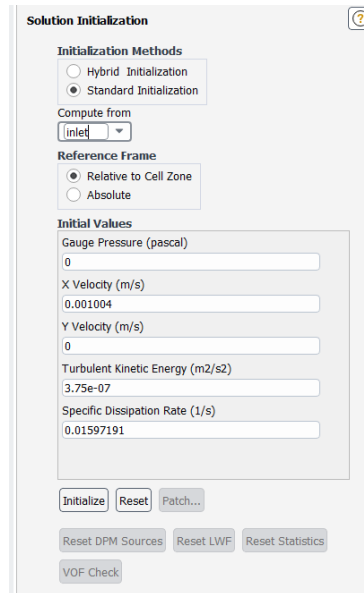


Figura 2.11 Configuración de la Inicialización

- Cálculo

Al haber inicializado se procede con el cálculo para lo cual es necesario configurar los siguientes datos: *number of time steps*, *time step size* y *max iterations*. Y se procede a calcular.

Solución

En esta parte para determinar el valor del C_D , se debe ir a la parte de *report definitions*, seleccionar el reporte que corresponde al C_D y calcular, se presentara el valor en la pantalla de consola.

Para el caso de los vórtices, en el *workbench* ubicarse en *results* y seleccionar contornos, configurar para la superficie, simetría, variable velocidad y de acuerdo al valor global configurar los rangos mínimos y máximos.

2.2 Configuración para la determinación del arrastre por oleaje marino sobre un cilindro parcialmente sumergido

Este análisis tiene por objeto calcular el coeficiente de arrastre generado por el oleaje marino sobre un cilindro que se encuentra parcialmente sumergido. Se partió del modelo generado para el dominio 2D para poder realizar el modelo 3D y representar la superficie

libre entre los fluidos agua y aire, se presenta a continuación la configuración de este modelo.

Para el caso de la modelación 3D, se inicia de igual forma en el área de trabajo *Workbench*, seleccionando el módulo *Fluid Flow (Fluent)*

Proceso de modelado

Al acceder a ANSYS *Workbench*, se selecciona el bloque *Fluid Flow (Fluent)*. Se debe asegurar que el modelo este configurado para 3D.

Geometría

En la parte de *Design Modeler* se genera el volumen del dominio de acuerdo al boceto en la parte del 2D (mostrado en la Figura 2.1), el cual tiene una altura h de 5 m, como se puede ver en la Figura 2.12.

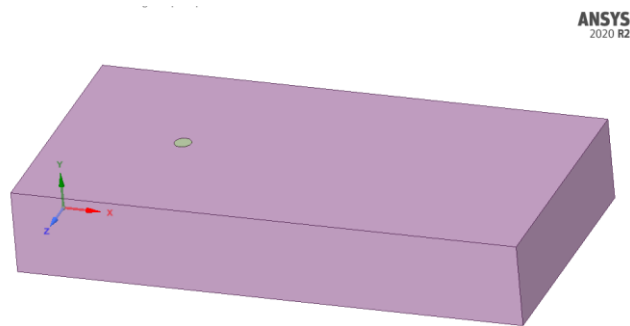


Figura 2.12 Dominio generado en 3D
(Fuente: Propia)

Malla computacional

Se definen las regiones que componen el dominio 3D, como se muestra en la Figura 2.13. Las regiones consideradas son: entrada (*inlet*), salida (*outlet*), paredes (*wall*), cilindro (*cylinder*) y el dominio del fluido (*fluid domain*). Es importante resaltar que las geometrías deben estar definidas de acuerdo a lo siguiente: dominio como fluido y el cilindro como sólido. Esto último se debe a que el programa debe considerar las dos geometrías para poder llevar a cabo la simulación correctamente.

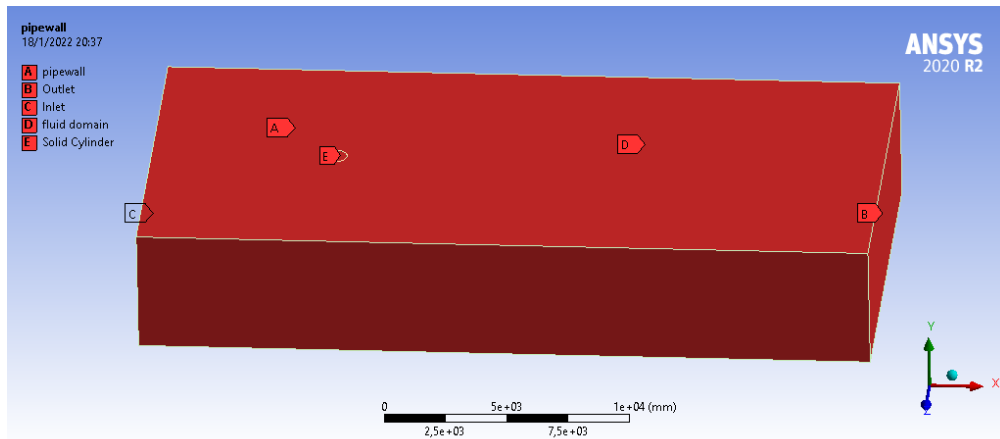


Figura 2.13 Regiones asignadas para el dominio 3D
(Fuente: Propia)

Definidas las regiones se procede a generar la malla. Se considera que cada elemento debe tener el mismo tamaño, en este caso un elemento cubico de acuerdo la Figura 2.14.

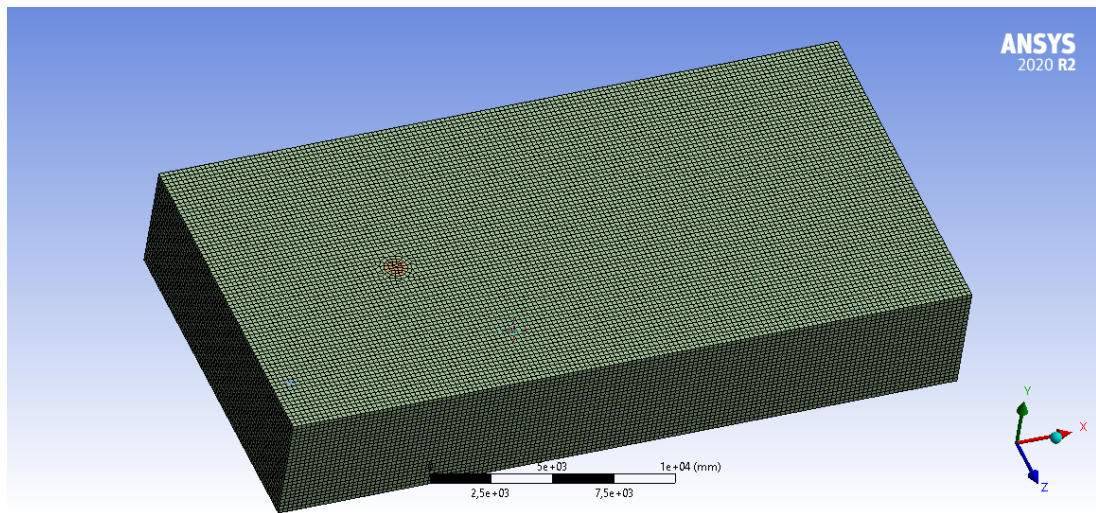


Figura 2.14 Mallado del dominio 3D
(Fuente: Propia)

Configuraciones para la simulación

Se debe seguir la misma secuencia de la Figura 2.6, tomando en cuenta las opciones para el *solver* que son: *Pressure-Based* (se considera como abierto a la atmosfera), *velocity: absolute*, *transient* y ubicar el valor de la gravedad.

- Selección del modelo

Al ubicarse en la parte de *Multiphase Model* se selecciona el modelo VOF (*Volume of Fluid*) ya que se tiene dos fases de fluido que no se van a mezclar.

Se configura el número de fases que son 2 (aire y agua). En la configuración de *VOF Sub-Models* se selecciona: *Open Channel Flow*, porque se considera que el dominio se encuentra abierto a la atmosfera; y, *Open Channel Wave BC*, donde se tomara en cuenta las condiciones del oleaje que previamente se mencionaron. Estas opciones se muestran en la Figura 2.15.

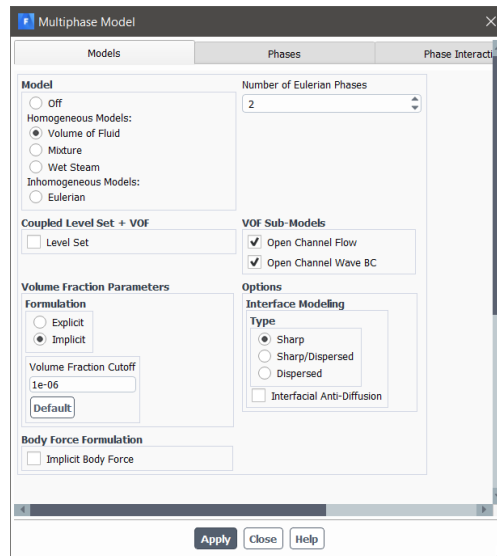


Figura 2.15 Configuración del *Multiphase Model*
(Fuente: Propia)

Al tener dos fluidos en el dominio, este debe ser configurado de acuerdo a fases primaria y secundaria, donde siempre se debe considerar como fase secundaria al fluido más denso, el cual es el agua en este caso. En la Figura 2.16. se muestra la configuración de las fases.

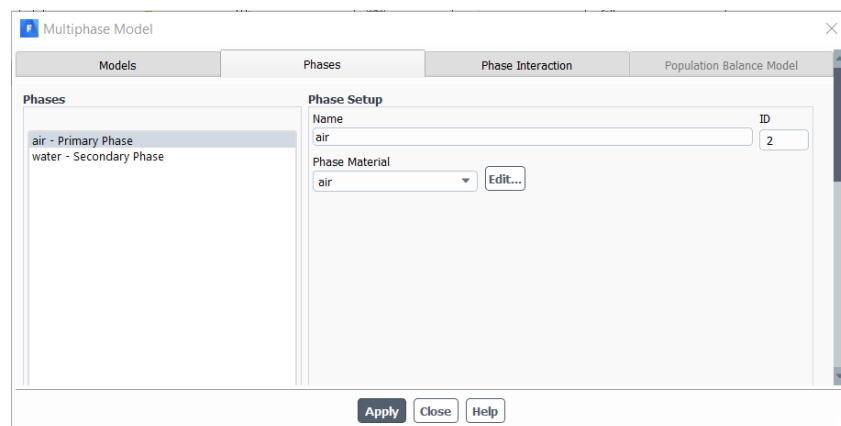


Figura 2.16 Fases del dominio
(Fuente: Propia)

La interacción de estos fluidos será por medio de la tensión superficial, la cual se configura de acuerdo a la Figura 2.17.

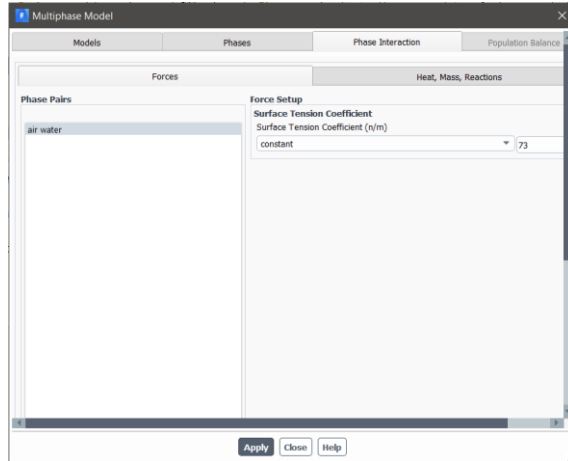


Figura 2.17 Interacción de los fluidos
(Fuente: Propia)

En esta parte cabe aclarar que, para las unidades de la tensión superficial, ANSYS toma la nomenclatura de n/m, donde n es mili Newtons.

Al tratarse de un flujo turbulento, se selecciona el modelo k-épsilon, como se ve en la Figura 2.18. A diferencia del resto de modelos, se sabe que este modelo produce resultados satisfactorios para propósitos de diseño de ingeniería para casos de flujos de alto número de Reynolds (Bangga et al., 2017).

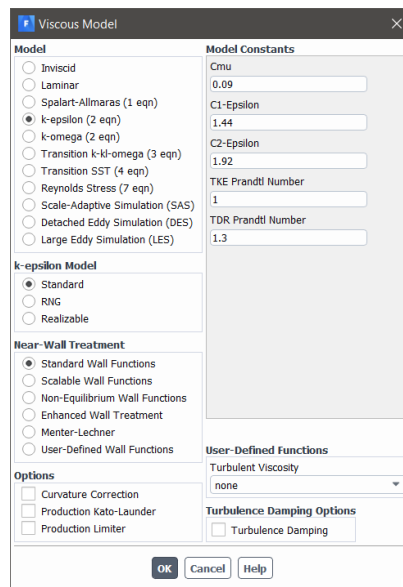


Figura 2.18 Selección del modelo
(Fuente: Propia)

- **Selección del material**

En este punto se deben agregar los fluidos con el que se va a realizar el análisis de acuerdo a la base de datos de ANSYS. Para este caso se ingresa agua líquida y aire.

- **Condiciones de contorno**

En las condiciones de entrada se seleccionó la parte de *Segregated Velocity Inputs*, según como se muestra en la Figura 2.19. para poder ingresar la velocidad de los fluidos, para el agua y aire de acuerdo a la Tabla 3.2.

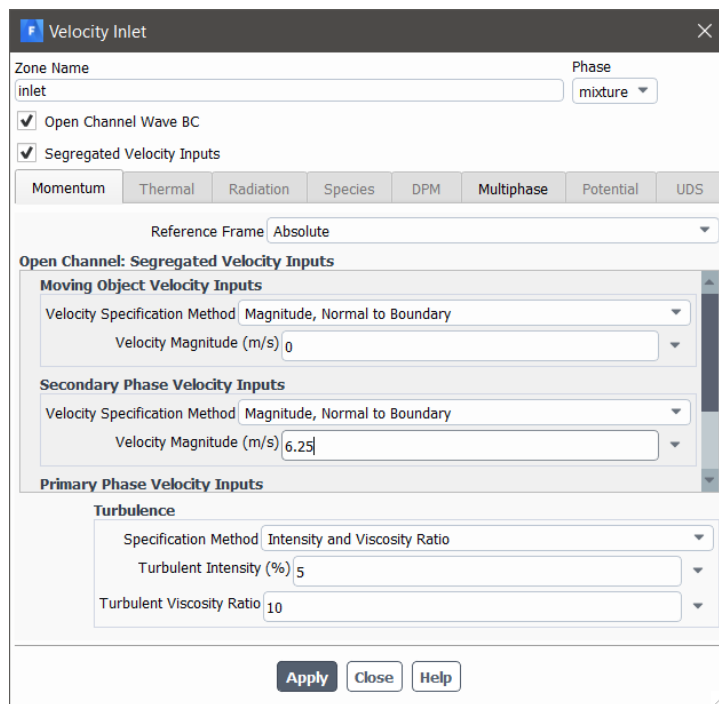


Figura 2.19 Configuración velocidad de entrada del dominio
(Fuente: Propia)

Se tiene como siguiente paso la configuración del *Multiphase*, donde se seleccionó la opción de olas intermedias (*Shallow/Intermediate Waves*), se determina la longitud de la altura de la superficie libre. Y con ello se ubican los valores de las condiciones que se muestran en la Tabla 3.2, como son la altura y longitud de onda de acuerdo al modelo de ola que se escogió, en este caso *wave Theories*, como se muestra en la Figura 2.20.

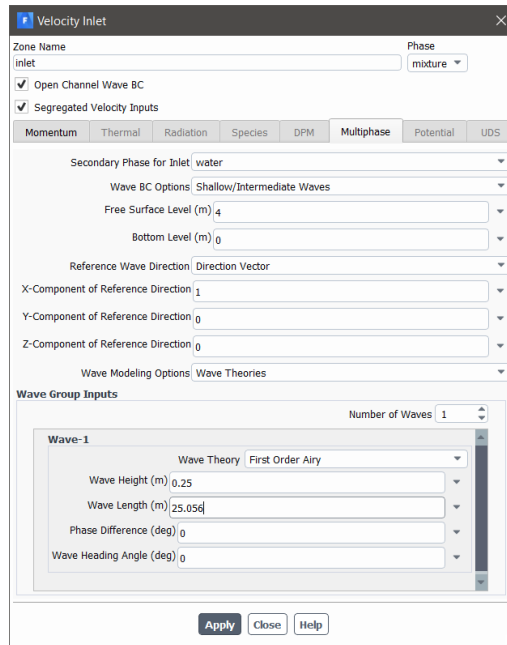


Figura 2.20 Condiciones de las olas
(Fuente: Propia)

Para el caso de las condiciones de salida (*outlet*) configurar correctamente de acuerdo a la opción de *Multiphase* y con ello ingresar la longitud de la altura de la superficie libre, de acuerdo a la Figura 2.21.

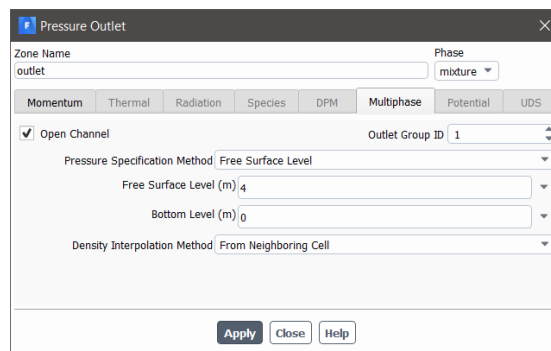


Figura 2.21 Configuración para la condición de salida.
(Fuente: Propia)

- Valores de referencia

En los valores de referencia se debe ajustar para que el cálculo se realice desde la entrada, como se ve en la Figura 2.22.

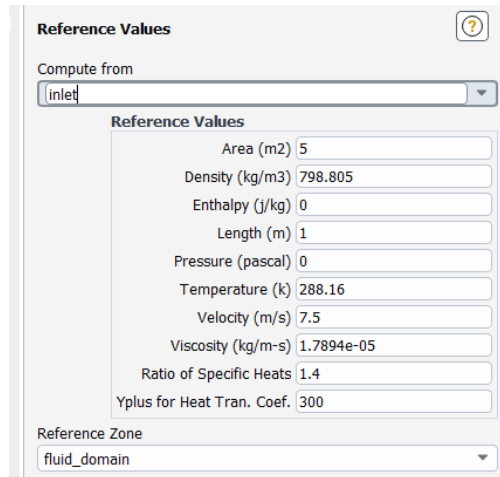


Figura 2.22 Configuración de los valores de referencia
(Fuente: Propia)

- **Determinación del coeficiente de arrastre**

Se seleccionó la parte de *Solutions* → *Report definitions* y se procede a elegir un nuevo reporte determinando el cálculo del coeficiente de arrastre sobre el cilindro, definido para este caso como *wall-6*, tal como se presenta en la *Figura 2.23*.

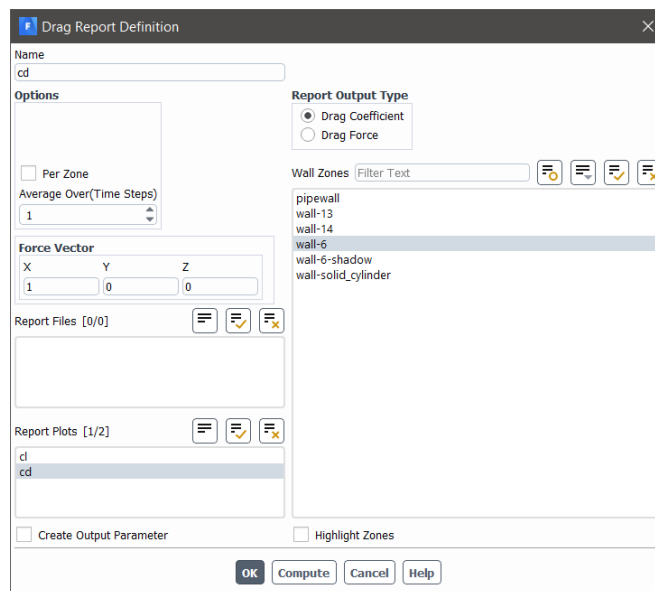


Figura 2.23 Determinación del C_d
(Fuente: Propia)

- **Inicialización**

El cálculo de todas las zonas se realizó mediante el método standard. y con ello dar clic en inicializar, de acuerdo a la *Figura 2.24*.

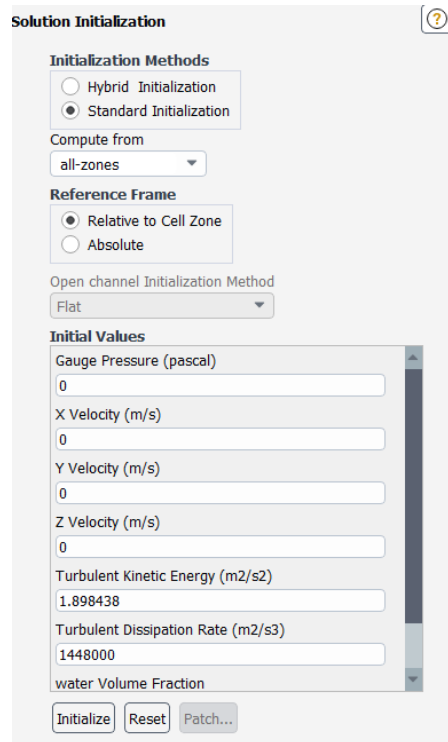


Figura 2.24 Configuración de la inicialización
(Fuente: propia)

- Actividades de cálculo

Se especifica la frecuencia de guardado automático de los datos. Además, se configura la presentación de las animaciones de las soluciones, lo cual nos permite observar cómo están interactuando las fases que se han configurado previamente. Para esto, se crea un nuevo contorno y con ello se selecciona el volumen de fracción del fluido que se quiera apreciar, como se muestra en la Figura 2.25 lo siguiente:

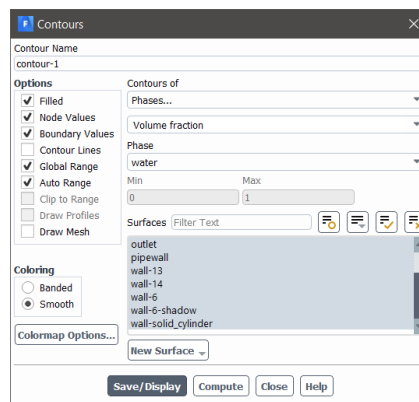


Figura 2.25 Contorno creado para visualizar las fases del dominio
(Fuente: Propia)

Al dar clic en *save/display* se podrá visualizar las fases del dominio como se muestra en la Figura 2.26.

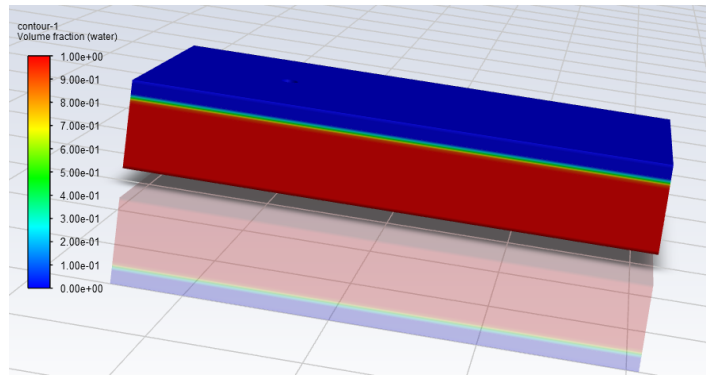


Figura 2.26 Fases del dominio, en rojo se presenta la fase agua líquida y azul la fase de aire.
(Fuente: Propia)

Solución

Como solución se tiene el valor del C_D , por lo que se debe ir a la parte de *report definitions*, seleccionar el reporte que corresponde al C_D y seleccionar calcular, se presentara el valor en la pantalla de consola.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se muestran las simulaciones realizadas en dominios 2D y 3D, considerando las ecuaciones fueron requeridas para determinar las condiciones en cada problema. Los resultados se muestran en función de los coeficientes de arrastre obtenidos. En el caso de las simulaciones en el dominio 3D se analizó la influencia de las variables del problema como son: altura del pilote que está sumergido y velocidad del oleaje.

3.1 Resultados

Datos para determinar el coeficiente de arrastre mediante análisis 2D

En un inicio se planteó el análisis del problema en un dominio 2D a diferentes regímenes de fluido considerando los datos de la Tabla 3.1. Mediante el uso de la Ecuación 1.7, se realiza el cálculo de la velocidad correspondiente a cada condición, este dato servirá como parámetro de entrada para realizar la simulación. Además, se debe considerar el cilindro de diámetro $D = 1 \text{ m}$ y el fluido de interacción es agua.

Tabla 3.1 Datos para el análisis en 2D

Re	$v \text{ (m/s)}$
40	$4,092 \times 10^{-5}$
100	$1,004 \times 10^{-4}$
1000	$1,004 \times 10^{-3}$
10000	$1,004 \times 10^{-2}$
3×10^5	0,301

(Fuente: propia)

Resultados del coeficiente de arrastre obtenidos de la simulación 2D

En las Tablas 3.2 y 3.3 se presentan los resultados que se han obtenido de las simulaciones del modelo 2D, los cuales fueron realizados con el objetivo de comprender de mejor manera el comportamiento del flujo alrededor de un cilindro a diferentes valores de número de Reynolds. Para esto, se parte desde un flujo en régimen laminar ($Re = 40$) hasta un flujo en régimen turbulento ($Re = 3 \times 10^5$) y se presenta el comportamiento del desprendimiento de los vórtices en la Figura 3.1, de acuerdo a los rangos antes mencionados.

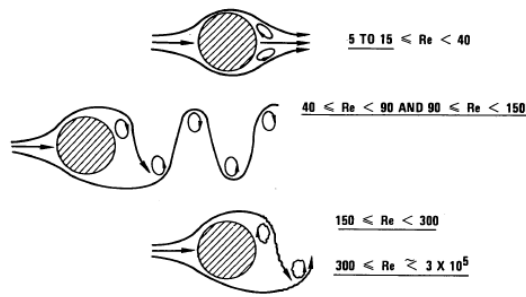
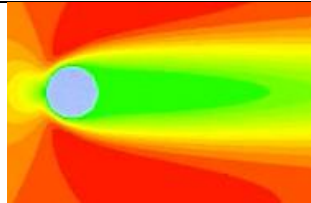
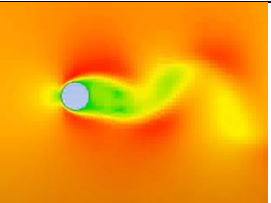
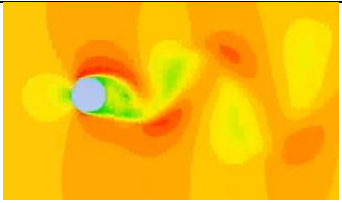
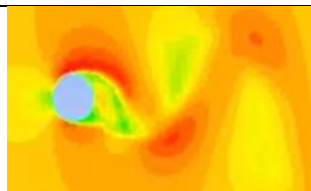
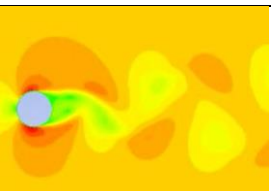


Figura 3.1 Régimen de números de Reynolds del flujo alrededor de un cilindro.
(Fuente: Blevins, 2001)

El análisis toma como referencia la información presentada en la Figura 3.1. Para un flujo con $Re = 40$, la literatura reporta un flujo estacionario, y se observa una estela simétrica detrás del cilindro, el cual consta de dos vórtices adheridos que son estables en el tiempo. En cambio, para un $Re = 100$, (Blevins, 2001) reporta el apareamiento de una estela con pequeñas oscilaciones asimétricas, lo cual se debe a la naturaleza del desprendimiento de vórtices de la superficie del cilindro. Este proceso es la transición a un flujo no estacionario, o calle de vórtices de Von Karman, el cual se desarrolla a medida que se aumenta el valor del número de Reynolds y los vórtices que están adheridos al cilindro aumentan su tamaño y comienza la inestabilidad, cabe aclarar que el aumento de los vórtices conlleva una disminución del coeficiente de arrastre.

Tabla 3.2 Resultados obtenidos de la simulación 2D

$Re = 40$	$Re = 100$	$Re = 1000$
		
$Re = 10000$	$Re = 3 \times 10^5$	
		

(Fuente: Propia)

Los resultados de la simulación 2D, los cuales se muestran en la Tabla 3.3, permiten concluir que a medida que aumenta el número de Reynolds (Re) disminuye el coeficiente de arrastre (C_D).

Tabla 3.3 Coeficiente de arrastre de diferentes números de Reynolds

Re	C_D
40	2,122
100	1,797
1000	1,135
10000	1,181
3×10^5	0,775

(Fuente: Propia)

Los resultados obtenidos son comparados con las curvas sugeridas por (Çengel & Cimbala, 2006) en la Figura 3.2, la cual muestra los valores de coeficiente de arrastre con respecto al número de Reynolds. Se puede observar que, para $Re = 40$ y $Re = 100$, los valores de C_D obtenidos vía simulación presentan cierta divergencia con la literatura, pero la tendencia es semejante. Para flujos que se encuentran en un régimen turbulento con números de Reynolds más altos, estos valores empiezan a diferir debido a que el fenómeno de desprendimiento de vórtices se vuelve tridimensional (Mares, 2018), lo cual requiere de un análisis 3D.

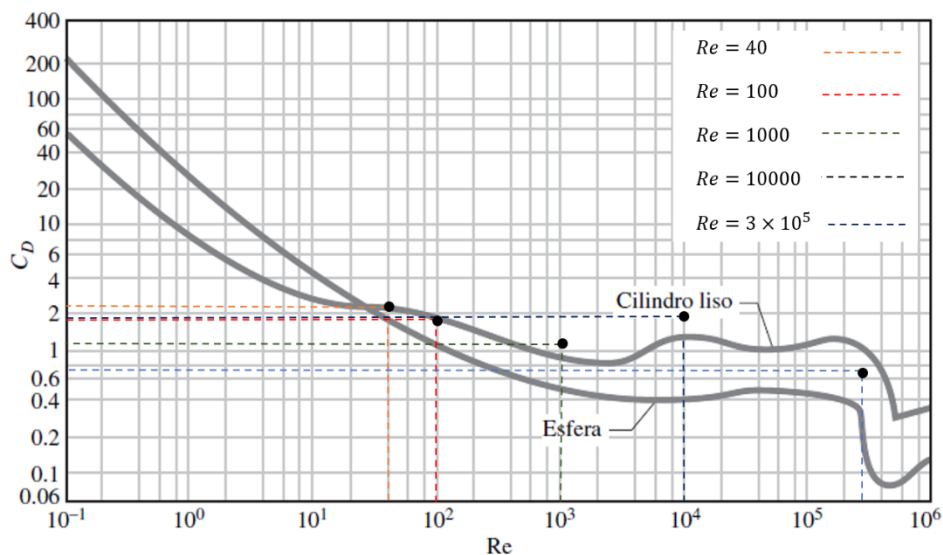


Figura 3.2 Coeficientes de arrastre de acuerdo a los números de Re que se han planteado.

(Fuente: Çengel & Cimbala, 2006)

Datos de las condiciones de oleaje para determinar el coeficiente de arrastre mediante análisis 3D

Para definir esta sección se utilizaron las Ecuaciones 1.1 y 1.2, las cuales corresponden a la longitud de onda y velocidad del oleaje, parámetros que permiten definir la configuración de la simulación 3D. Los resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Datos de las condiciones de las condiciones de oleaje.

Parámetro	
Altura (H)	0,25 (m)
Longitud de onda (λ)	25,056 (m)
Velocidad de oleaje (v)	6,25 (m/s)
Diámetro (D)	1 (m)
Fluido	Agua

(Fuente: Propia)

Resultados obtenidos del coeficiente de arrastre obtenidos de la simulación 3D

En esta sección se determinó el tamaño de malla más adecuado para realizar el estudio del problema en el dominio 3D. La cantidad de elementos fue determinada mediante un estudio de la dependencia de los resultados de C_D de la cantidad de los elementos como bien se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de C_D de acuerdo a tamaño de malla y número de elementos

Tamaño de malla (m)	Número de elementos	C_D
0,15	717724	0,655
0,16	599070	0,664
0,18	417571	0,6645
0,20	292968	0,671
0,25	179138	0,697
0,30	85683	0,830

(Fuente: Propia)

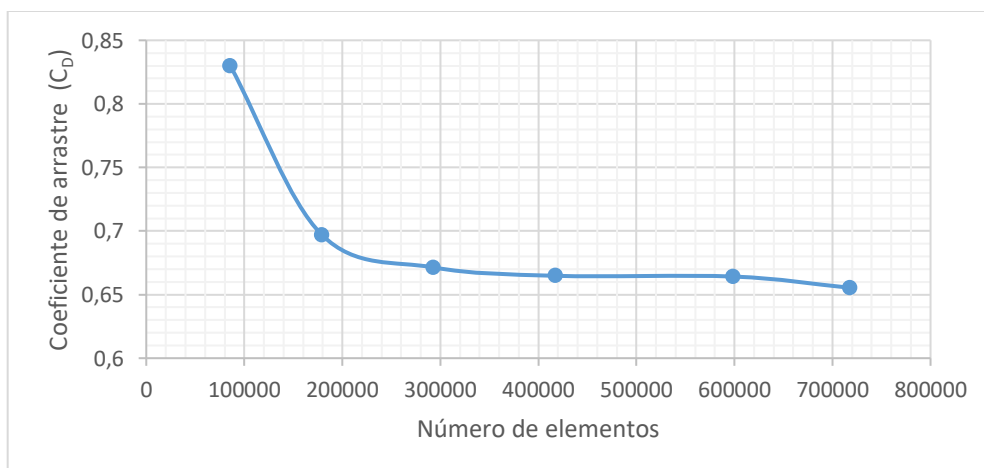


Figura 3.3 Tendencia del valor del C_D número de elementos de malla (Fuente: propia)

Se observa a partir de la Figura 3.2 que el valor de C_D permanece constante para un valor de $C_D = 0,66$ y se determina que el tamaño de malla más adecuado de acuerdo a la Tabla 3.5 es $0,18\text{ m}$.

Estudio paramétrico del coeficiente de arrastre en función de los parámetros de altura sumergida del pilote y velocidad del oleaje.

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para diferentes porcentajes de inmersión del cilindro en el medio líquido y diferentes velocidades del oleaje. Es importante mencionar que la velocidad del oleaje y la altura del mismo son dos parámetros relacionados, por lo tanto, no pueden ser modificados arbitrariamente.

Primero, se realizó un análisis de la influencia de la altura sumergida del pilote, para lo cual se mantuvo constante la velocidad del oleaje. Los valores de porcentaje sumergido de la columna se observan en la Tabla 3.6, para lo cual se usa como referencia una altura total de cilindro de $h = 5\text{ m}$. Por otro lado, en la Tabla 3.7 se muestra las condiciones de oleaje, para lo cual se tomaron variaciones de $\pm 20\%$ de la velocidad de oleaje calculada en la Tabla 3.7 ($\pm 1,25\text{ m/s}$).

Tabla 3.6 Porcentaje de altura sumergida del pilote

$\%h$	$h\text{ (m)}$
50	2,5
60	3,0
70	3,5
80	4,0

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7 Variación velocidad del oleaje

Variación de v	$v\text{ (m/s)}$
$v_{-2,5}$	3,75
$v_{-1,25}$	5,0
v	6,25
$v_{+1,25}$	7,50
$v_{+2,5}$	8,75

(Fuente: Propia)

En las Tablas 3.8 a la 3.11 se muestran los resultados de C_D obtenidos de las simulaciones 3D donde se variaron parámetros de la altura sumergida del pilote h y la velocidad de oleaje v . Es importante mencionar que en estas tablas aparecen dos parámetros adicionales, los cuales son la altura del oleaje (H) y la longitud de onda (λ). De acuerdo a las Ecuaciones

1.1 y 1.2, la velocidad depende de λ y esta a su vez de H , obteniéndose todos estos valores para las velocidades mostradas en las Tabla 3.8 – 3.11.

Tabla 3.8 Resultados obtenidos de acuerdo al 50% de la altura del cilindro, $h = 2,5$ m.

h (m)	v (m/s)	H (m)	λ (m)	C_D
2,50	3,75	0,032	9,006	0,614
	5,0	0,102	16,012	0,609
	6,25	0,250	25,057	0,558
	7,50	0,516	36,027	0,527
	8,75	0,958	49,037	0,511

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9 Resultados obtenidos de acuerdo al 60% de la altura del cilindro, $h = 3,0$ m.

h (m)	v (m/s)	H (m)	λ (m)	C_D
3,0	3,75	0,032	9,006	0,632
	5,0	0,102	16,012	0,625
	6,25	0,250	25,057	0,591
	7,50	0,516	36,027	0,558
	8,75	0,958	49,037	0,541

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10 Resultados obtenidos de acuerdo al 70% de la altura del cilindro, $h = 3,5$ m.

h (m)	v (m/s)	H (m)	λ (m)	C_D
3,50	3,75	0,032	9,006	0,668
	5,0	0,102	16,012	0,651
	6,25	0,250	25,057	0,634
	7,50	0,516	36,027	0,591
	8,75	0,958	49,037	0,575

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11 Resultados obtenidos de acuerdo al 80% de la altura del cilindro, $h = 4,0$ m.

h (m)	v (m/s)	H (m)	λ (m)	C_D
4,0	3,75	0,032	9,006	0,695
	5,0	0,102	16,012	0,684
	6,25	0,250	25,057	0,665
	7,50	0,516	36,027	0,616
	8,75	0,958	49,037	0,593

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3 se han graficado los valores correspondientes al C_D de acuerdo a las alturas que se han mostrado en la Tabla 3.6. La definición del número de Reynolds (Ecuación 1.9) muestra que es directamente proporcional a la velocidad del flujo. Por lo tanto, si la velocidad del flujo aumenta, el número de Reynolds lo hace de igual manera.

Al observar los valores obtenidos de C_D , se tiene que estos disminuyen a medida que aumenta la velocidad del oleaje. De esta manera, se observa que el C_D tiene una tendencia decreciente con la velocidad del oleaje. Sin embargo, es necesario mencionar que la relación no es exactamente proporcional. La tendencia que se observa se debe a que, al aumentar la velocidad de oleaje se tiene un flujo no estacionario lo que provoca fluctuaciones importantes, son estas las que causan un declive en los valores de C_D , ya que el flujo en la capa límite es totalmente turbulento.

Así mismo a medida que se aumenta el número de Reynolds se logra que se desarrolle por completo la turbulencia por lo que la estela adherida al cilindro se estrecha provocando así que la calle de vórtices de Von Karman desaparezca, aumentando los vórtices y disminuyendo el arrastre.

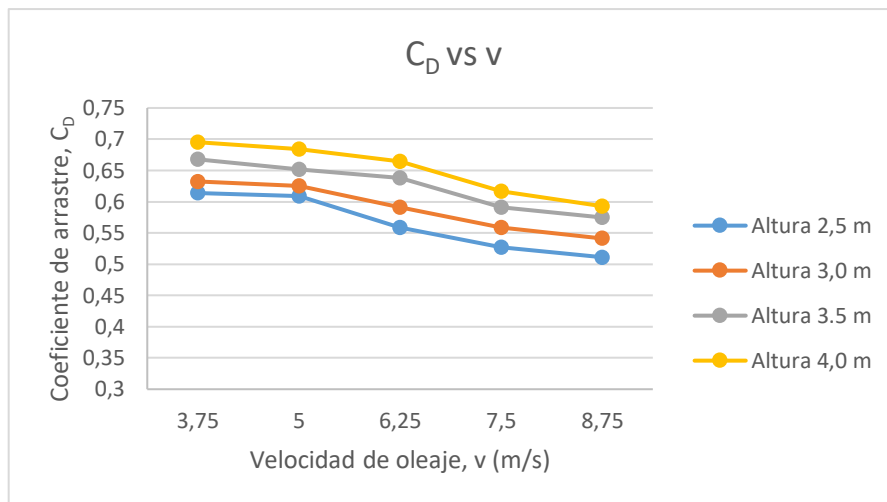


Figura 3.4 Curvas de velocidad del oleaje con respecto al coeficiente de arrastre clasificadas de acuerdo a la altura del cilindro sumergido. (Fuente: Propia)

Posterior al análisis de los resultados en función de la velocidad, se reagruparon los resultados para realizar el análisis en función de la altura sumergida del cilindro para un valor de velocidad constante. Para esto, los resultados se usan los resultados que se muestran en la Tabla 3.12 hasta la Tabla 3.16.

Tabla 3.12 Resultados obtenidos de acuerdo a la variación de velocidad, $v = 3,75 \text{ m/s}$.

$v(m/s)$	$h(m)$	C_D
3,75	2,5	0,613
	3,0	0,632
	3,5	0,667
	4,0	0,695

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13 Resultados obtenidos de acuerdo a la variación de velocidad, $v = 5,00 \text{ m/s}$.

$v(m/s)$	$h (m)$	C_D
5,0	2,5	0,609
	3,0	0,626
	3,5	0,651
	4,0	0,684

(Fuente: Propia)

Tabla 3.14 Resultados obtenidos de acuerdo a la variación de velocidad, $v = 6,25 \text{ m/s}$.

$v(m/s)$	$h (m)$	C_D
6,25	2,5	0,558
	3,0	0,591
	3,5	0,638
	4,0	0,665

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15 Resultados obtenidos de acuerdo a la variación de velocidad, $v = 3,75 \text{ m/s}$.

$v(m/s)$	$h (m)$	C_D
7,50	2,5	0,527
	3,0	0,558
	3,5	0,591
	4,0	0,616

(Fuente: Propia)

Tabla 3.16 Resultados obtenidos de acuerdo a la variación de velocidad, $v = 3,75 \text{ m/s}$.

$v(m/s)$	$h (m)$	C_D
8,75	2,5	0,511
	3,0	0,541
	3,5	0,575
	4,0	0,593

(Fuente: Propia)

Los resultados de C_D en función del porcentaje inmerso de la columna son presentados en la Figura 3.4. Se puede observar que la tendencia no es lineal pero que crece a medida que la altura sumergida del cilindro aumenta, demostrando que la altura sumergida h y el coeficiente de arrastre C_D , están relacionados.

Al hablar del oleaje marino se tiene parámetros como son la altura de la ola H y la longitud de onda λ , los cuales permiten que el agua tenga un mayor contacto con la superficie del cilindro. Considerando que el agua genera un mayor arrastre, esta produce un incremento en el arrastre.

Por otro lado, cuando se analizan los resultados en función de la altura sumergida de la columna se tiene que si se aumenta la altura sumergida del cilindro, el arrastre también

aumenta. Este resultado también está relacionado con el porcentaje sumergido de la columna.

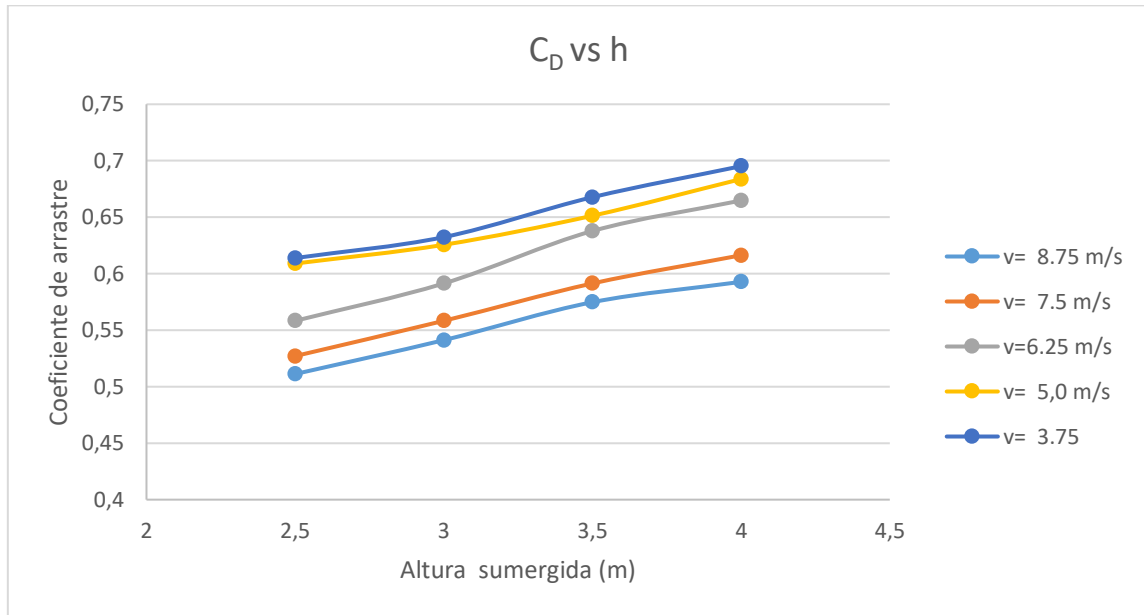


Figura 3.5 Curvas de velocidad del oleaje con respecto al coeficiente de arrastre clasificadas de acuerdo a la velocidad del oleaje.
(Fuente: Propia)

3.2 Conclusiones

- La revisión bibliográfica permitió distinguir los tipos de estructuras offshore que existen y las operaciones para las cuales estas son usadas en el mar. De este modo, se identificaron las condiciones a las que se encuentran expuestas y qué efectos pueden tener sobre la integridad de la estructura.
- El Campo Amistad al poseer plataformas offshore que se presentaron en este estudio como como un cilindro circular. Estas estructuras están sometidas a fuerzas de arrastre las cuales fueron analizadas de acuerdo a las condiciones del oleaje marino, variando la velocidad del oleaje y el porcentaje de altura sumergido del cilindro.
- En lo que se refiere al análisis de las fuerzas de arrastre en el dominio 2D, se puede observar que los valores de C_D disminuyen a medida que la velocidad aumenta esto debido al incremento en el número de Reynolds, lo cual origina un cambio de régimen laminar a turbulento. Esta circunstancia lleva a un aumento de los vórtices

que se encuentran adheridos al cilindro y son estos vórtices los que causan que los valores de C_D disminuyan.

- A partir de las simulaciones se pudo notar que, conforme el número de Reynolds aumenta, el fenómeno de desprendimiento de vórtices y la calle que estos forman posterior al cilindro (calle de Von Karman), pasa de ser un problema que puede ser resuelto en un dominio 2D a otro que necesita ser resuelto en 3D. Esto se debe a que el régimen es totalmente turbulento.
- Al realizar el análisis de los resultados obtenidos en dominio 2D, se observa que para valores de $Re = 40$ y $Re = 100$, los valores de C_D obtenidos via simulación están de acuerdo a los reportados en la literatura. Para valores mayores de Reynolds el flujo se encuentra en un régimen turbulento y esto hace que los resultados de las simulaciones difieran ligeramente con los reportados en la literatura, manteniendo la misma tendencia.
- El análisis del C_D en función de la velocidad del oleaje muestra que, a mayor velocidad de oleaje menor es el valor de C_D , lo cual está relacionado con el aumento del número de Reynolds, los cuales ubican al flujo en régimen turbulento. Sin embargo, es importante mencionar que la relación no es precisamente lineal.
- En lo que respecta al análisis de C_D en función del porcentaje sumergido de la columna, se obtuvo que, a mayor porción de columna sumergido, mayor es el arrastre.,. Sin embargo, es importante mencionar que la relación no es precisamente lineal.

3.3 Recomendaciones

- En el caso de poseer un poder computacional limitado, se recomienda ajustar adecuadamente la frecuencia con la que se guardan los datos de la simulación ya que el requerimiento de almacenamiento es importante para la realización de la simulación 3D.
- Los resultados que se obtuvieron sirven como referencia por lo que se recomienda la realización de pruebas experimentales y que así se puedan validar estos resultados.

- ANSYS Fluent permite modificar las condiciones de oleaje de acuerdo a los parámetros presentados es por esto que se recomienda prestar atención en los valores que se deben modificar para obtener resultados coherentes.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ageitos, A. (2015). *Sistemas de Anclaje y Posicionamiento de buques y plataformas offshore*. Tenerife: ULL.
- Aguirre, F. (2012). *Ecuador - Gas Natural, Campo Amistad Bloque 3 (actual 6)*. Quito: UTE.
- Baker, R. (2004). Oil and Natural Gas: Offshore Operations. (C. J. Cleveland, Ed.) *Encyclopedia of Energy*, 581-584. doi:<https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00258-8>.
- Bangga, G., Ashfahami, A., Sugianto, E. S., Putri, T., Jost, E., & Lutz, T. (2017). Three-Dimensional Flow in the Vicinity of a Circular Cylinder Mounted to a Flat Plate at High Reynolds Number. *AIP Conference Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1063/1.4968265>
- Barzallo, M., & Bermúdez, D. (2016). *Estudio de Compartimentalización Del Campo Amistad*. Guayaquil: ESPOL.
- Bio Surf Camp. (28 de enero de 2022). *La luna y las mareas: ¿Qué son, cómo se producen?* Obtenido de <https://www.biosurfcamp.com/es/que-son-las-mareas-como-se-producen/>
- Blevins, R. (2001). *Flow-Induced Vibration* (2 ed.). Malabar: Krieger Publishing Company.
- Campos, D., Cabrera, J., Martínez, J., Cornejo, L., & Espinosa, E. (2017). Structural Safety of Oil Jack-Up Rigs in Operation. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. doi:<http://dx.doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2017.18n1.001>
- Carvajal, L. (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado* (28 ed.). Santiago de Cali: U.S.C.
- Castro, S. (2020). *Análisis de los rubros unitarios y el punto de equilibrio económico en la cadena de valor de gas natural en el Campo Amistad para el periodo 2016-2022*. Quito: UCE.
- Çengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*. . México, D.F: McGraw-Hil.
- Chico, C., & Cuaces, H. (2016). *Alternativas de Intervención para Incrementar la Producción de Pozos de Gas del Campo Amistad*. Quito: EPN.
- Dasca, I., & Morera, M. (2014). *Diseño y Cálculo de una plataforma petrolífera en el Mar del Norte*. Barcelona: UPC.
- DNV. (2011). Marine Operations, General. Recuperado el 21 de noviembre de 2021
- Félix, J. (2011). *Seguridad e Integridad estructural de plataformas marinas*. México D.F: IPN.
- Flores, P., & Valle, D. (2014). *Propuesta para optimizar las operaciones de perforación de nuevos pozos en el campo Amistad, mediante el Análisis de los problemas presentados en la perforación de los pozos Amistad 5 y 7 del Golfo de Guayaquil, Bloque 3 (hoy Bloque 6)*. Quito: UCE.

- Fu, F. (2018). Design and Analysis of Tall and Complex Structures. *Design of Offshore Structures*, 251-293. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101018-1.00008-3>.
- Galmés, J. (s.f.). *Diseño innovador de diques verticales con geometrías cilíndricas*.
- Guachamin, W., Li, L., Gao, Z., & Moan, T. (2016). Methodology for assessment of the operational limits and operability of marine operations. *ELSEVIER*, 308-327. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.015>
- Jiménez, B. (2021). *Desarrollo de prácticas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como complemento didáctico del Laboratorio de Energía y Fluidos de la CIEM-UNL*. Loja: UNL.
- Kanchwala, H. (13 de nov de 2021). *Oil Extracted Offshore*. Obtenido de <https://www.scienceabc.com/innovation/oil-extracted-offshore-life-offshore.html>
- Kosleck, S., & Clauss, G. &. (2004). *Deepwater Solutions for Offshore Production Technology*.
- Lausová, L., Kolos, I., & Michalcová, V. (2019). Comparison of 2D grid simulations for past cylinder at high Reynolds numbers. *Sciendo*.
- Mares, A. (2018). *Análisis numérico de flujo no estacionario alrededor de cuerpos romos (Aplicación al ruido de underhood)*. Valencia: UPV.
- masmar. (18 de noviembre de 2013). *Características de las olas. Longitud de onda, altura, amplitud, dirección*. Obtenido de <http://www.masmar.net/index.php/esl/Apuntes-N%C3%A1uticos/Oceanograf%C3%ADa/Caracter%C3%ADsticas-de-las-olas.-Longitud-de-onda,-altura,-amplitud,-direcci%C3%B3n>
- Muñoz, G. (2018). *Fenómenos de Degradación en Infraestructuras*. Santa Clara: UCLV.
- Noboa, S., & Palacios, O. (2013). Caracterización preliminar de las Corrientes Marinas para la determinación de sitios potenciales de Generación Eléctrica en el Ecuador.
- Pelayo, L. (2018). *Marine Corrosion in Offshore Structures*. Cantabria: UC.
- Pendón, G. (2017). *La Costa de Huelva: Una Introducción a los Procesos y Productos Sedimentarios*. Huelva, España: UHU.
- PETRAMAZONAS EP. (2014). *Plan de Desarrollo del Bloque 6 (Campo Amistad)*.
- PETROAMAZONAS EP. (2018). *Plan de Desarrollo - Campo Amistad*.
- Pritchard, P., & Leylegian, C. (2011). *Fox and McDonald's: Introduction To Fluid Mechanics* (8th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Rodríguez, R., & Chimbo, M. (2017). Aprovechamiento de la Energía Undimotriz en el Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*(17), 23-28. doi:<https://doi.org/10.17163/ings.n17.2017.03>
- Salinas, M., Vicente, W., Chol, E., & Leyva, V. (2007). Simulación de la turbulencia de un flujo que pasa alrededor de un cilindro de sección cuadrada a partir de la utilización de la simulación de grandes escalas y de fronteras inmersas. *Revista mexicana de física*, 461-469. Obtenido de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X20070006000006&lng=es&tlng=es.

Sato, M., & Kobayashi, T. (2012). A fundamental study of the flow past a circular cylinder using Abaqus/CFD.

Vera, L., Lucero, M., & Mindiola, M. (2009). Caracterización Oceanográfica de la costa central ecuatoriana entre la punta del Morro y Jaramijó, Ecuador. *Acta oceanográfica del Pacífico*, 15.

Zhang, X.-t., Li, Z.-y., Fu, S.-x., Ong, M. c., & Chen, Y. (2014). Study of the flow around a cylinder from the subcritical to supercritical regimes. *Ocean Systems Engineering*, 4(3). doi:<http://dx.doi.org/10.12989/ose.2014.4.3.000>

5 ANEXOS

ANEXO I. Algunos resultados obtenidos de coeficiente de arrastre mediante la simulación 3D.

ANEXO II Modelo 3D usado para la obtención de los valores de coeficiente de arrastre.

5.1 ANEXO I

Tabla 5.1 Curvas obtenidas de la simulación realizada para una altura variable h y velocidad de oleaje $v = 6,25 \text{ m/s}$

$V = 6,25 \text{ m/s}$						
$h \text{ (m)}$	Curva obtenida	C_D				
2,5		<table border="1"> <tr> <td style="text-align: right;">Cd</td> <td style="text-align: left;">()</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">wall-6</td> <td style="text-align: left;">0.55837921</td> </tr> </table>	Cd	()	wall-6	0.55837921
Cd	()					
wall-6	0.55837921					
3,00		<table border="1"> <tr> <td style="text-align: right;">Cd</td> <td style="text-align: left;">()</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">wall-6</td> <td style="text-align: left;">0.59145897</td> </tr> </table>	Cd	()	wall-6	0.59145897
Cd	()					
wall-6	0.59145897					
3,5		<table border="1"> <tr> <td style="text-align: right;">Cd</td> <td style="text-align: left;">()</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">wall-6</td> <td style="text-align: left;">0.63789424</td> </tr> </table>	Cd	()	wall-6	0.63789424
Cd	()					
wall-6	0.63789424					
4		<table border="1"> <tr> <td style="text-align: right;">Cd</td> <td style="text-align: left;">()</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">wall-6</td> <td style="text-align: left;">0.66482823</td> </tr> </table>	Cd	()	wall-6	0.66482823
Cd	()					
wall-6	0.66482823					

5.2 ANEXO II

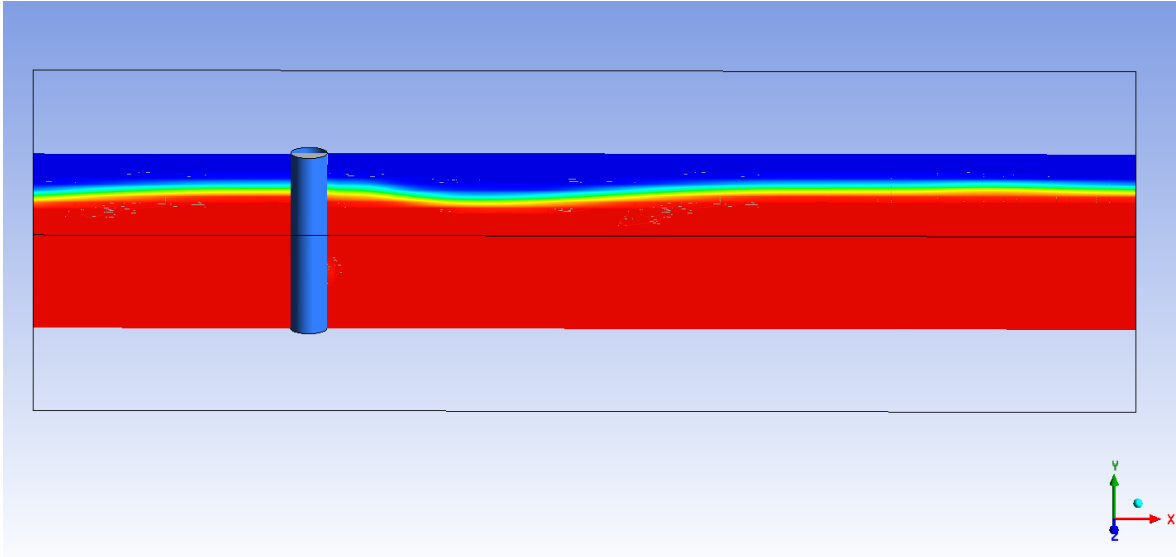


Figura 5.1 Modelo 3D de una estructura sometida al arrastre por oleaje marino para una altura $h = 4$ (m) y velocidad de oleaje $v = 6,25$ m/s