

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# Análisis de la socavación inducida por hélices durante las maniobras de atraque y desatraque

Trabajo realizado por: Julio García-Maribona López-Sela

Dirigido: *Javier López Lara* 

Titulación: **Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos** 

Santander, Julio de 2017





# Contenido

1.	INTE	INTRODUCCIÓN				
	1.1.	DES	ARROLLO DEL TRÁFICO MARÍTIMO	3		
	1.2.	MEJ	IORAS EN LOS SISTEMAS DE PROPULSIÓN	4		
	1.3. EL PROBLEMA DE		ROBLEMA DE LA SOCAVACIÓN INDUCIDA	5		
	1.4.	ALG	UNOS CASOS DOCUMENTADOS	7		
	1.4.1.		Puerto de Motril (Granada)	7		
	1.4.2.		Puerto de Gijón (Asturias)	7		
	1.5.	EL C	DISEÑO FRENTE A LA SOCAVACIÓN	8		
2.	EST/	ESTADO DEL ARTE				
	2.1.	.1. CONCEPTOS GENERALES DEL FLUJO EN HÉLICES				
	2.1.1.		Flujo en hélices y flujo en jets (chorros)	9		
	2.1.2.		Determinación de la velocidad de salida y teoría del disco actuador	10		
	2.1.3.		Parámetros básicos de los álabes de una hélice	12		
	2.2.	APR	OXIMACIONES AL PROBLEMA	13		
	2.2.1.		El análisis de socavación inducida por hélices.	13		
	2.2.2.		Ingenieril	14		
	2.2.3.		Científica	25		
	2.2.4.		Métodos numéricos CFD	33		
	2.2.5.		Resumen de publicaciones	35		
	2.3.	SUN	ARIO Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DISPONIBLES.			
	2.4.	OBJ	ETIVOS	37		
	2.5.	APC	ORTACIÓN DEL TRABAJO			
3.	MET	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CAMPO CERCANO				
	3.1.	ANÁ	ÁLISIS DEL CAMPO CERCANO			
	3.2.	GEC	DMETRÍA			
	3.3.	MA	LLA	40		
	3.4.	CON	NDICIONES DE CONTORNO	41		
	3.4.1.		Velocidad axial	41		
	3.4.2.		Velocidad radial			
	3.4.3.		Velocidad tangencial.	42		
	3.4.	4.	Condiciones de contorno para la velocidad.	43		
	3.4.5.		Condiciones de contorno para el modelo de turbulencia			
	3.4.	6.	Condiciones de contorno para presión.			





	3.4.7.	Resumen de parámetros para la simulación	46					
4.	RESUL	TADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLSIS DE CAMPO CERCANO	47					
4.1	1. C	ONTORNOS DE VELOCIDAD Y LÍNEAS DE CORRIENTE	47					
	4.1.1.	Contornos de velocidad en el plano longitudinal	47					
	4.1.2.	Contornos de velocidad en secciones transversales						
	4.1.3.	Líneas de corriente						
4.2	2. V.	ALIDACIÓN DEL MODELO Y GRÁFICOS COMPARATIVOS						
4.3	3. PI	ERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL Y RADIAL	51					
4.4	4. A	NÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA INTENSIDAD TURBULENTA	54					
5.	ΜΕΤΟΙ	DOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CAMPO LEJANO	58					
5.1	1. G	EOMETRÍA	58					
5.2	2. N	IALLA	58					
5.3	3. C	ONDICIONES DE CONTORNO	59					
	5.3.1.	Condiciones para la velocidad	59					
	5.3.2.	Condiciones de contorno para el modelo de turbulencia	60					
	5.3.3.	Tratamiento del fondo	60					
5.4	4. R	ESUMEN DE PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	62					
6.	RESUL	TADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS DE CAMPO LEJANO	63					
6.1	1. C	ONTORNOS DE VELOCIDAD	63					
	6.1.1.	Contornos de velocidad en el plano longitudinal	63					
	6.1.2.	Contornos de velocidad en planos transversales	65					
	6.1.3.	Líneas de corriente	67					
6.2	2. G	RÁFICOS DE VELOCIDAD	69					
6.3	3. C	ONTORNOS DE TENSIÓN TANGENCCIAL EN EL FONDO	71					
6.4	4. PI	ERFIL DE VELOCIDADES TANGENCIALES EN EL FONDO	74					
6.5	5. C	ONTORNOS DE $y$ +	76					
7.	7. APLICACIÓN PRÁCTICA							
7.1	1. A	DAPTACIÓN DE LOS MÉTODOS DISPONIBLES	78					
	7.1.1.	Método alemán	78					
	7.1.2.	Método danés	78					
	7.1.3.	Método de la ROM:	78					
	7.1.4.	Modelo CFD	79					
	7.1.5.	Resumen	79					
7.2. METODOLOGÍA COMPLETA CON CFD80								
	7.2.1.	Aplicación al caso de estudio	80					





#### 





# 1. INTRODUCCIÓN.

# 1.1. DESARROLLO DEL TRÁFICO MARÍTIMO.

El tráfico marítimo está sujeto a constantes procesos de cambio para adaptarse a la demanda de transporte internacional, desarrollando diferentes estrategias que le permitan competir con el tráfico terrestre fundamentalmente. En largas distancias el barco es el principal método de transporte de mercancías mientras que en distancias menores debe competir con otros como el ferroviario o por carretera. Además, han surgido fórmulas que combinan transporte marítimo y terrestre para mejorar la eficiencia (como las llamadas autopistas del mar). En cuanto al transporte de pasajeros, el barco debe competir con la aviación comercial; en largas distancias el transporte marítimo de pasajeros es fundamentalmente en cruceros mientras que en distancias más cortas se emplean ferris rápidos.

En los últimos años se viene produciendo un incremento en el tamaño de los buques para transporte de mercancías y personas como parte de estas estrategias para hacer el transporte marítimo más competitivo. Este incremento busca mejorar el rendimiento económico de los viajes mediante economías de escala: el coste unitario se reduce al repartir el coste fijo entre una mayor cantidad de unidades. Sin embargo, este efecto está limitado por una serie de factores de tipo económico, técnico y operacional. Entre ellos destaca el económico, el efecto de la economía de escala es cada vez menor ya que al aumentar el tamaño del barco por encima de determinados valores se incrementan o aparecen nuevos costes fijos, como son por ejemplo los de seguros, inversión inicial y uso de busques *feeder* (destinados al transporte entre puertos principales y secundarios, donde los grandes barcos no pueden acceder o no es rentable que lo hagan). Los factores operacionales tienen en cuenta por ejemplo el tamaño máximo que puede atravesar los canales de navegación importantes como el de Panamá o el de Suez.



Ilustración 1: En el gráfico izquierdo el incremento de costes fijos con el aumento del tamaño, en el derecho la evolución del coste unitario al aumentar el tamaño. Tomados del informe "Is the drive for ever bigger containerships irresistible?" de Martin Stopford.

Estas limitaciones se aplican a determinados tipos de barco, tales como petroleros, graneleros o transporte de contenedores. Sin embargo, hay ciertos tipos de barco en los que sigue siendo rentable aumentar su tamaño, como es el caso de los cruceros. Los cruceros son capaces de ofrecer servicios de alto nivel a precios relativamente bajos si se compara con el turismo terrestre, por una parte, los problemas operacionales pueden evitarse seleccionando el itinerario del crucero y los puertos de parada, además, dado el tipo de actividad, no incurren en ciertos gastos que limitan la economía de escala (por ejemplo, en el uso de *feeders*). Es





importante notar que buena parte de los problemas operativos están relacionados con la obra de ingeniería civil, ya sean canales de navegación, puertos u otras.

Otra de las posibles estrategias para incrementar la competitividad es mejorar los tiempos de viaje. Para ello se puede trabajar para agilizar las operaciones de carga/descarga, maniobras y velocidad de desplazamiento. Una tipología de barco donde el tiempo de viaje es fundamental y ha dirigido su estrategia de competitividad en este sentido han sido los buques Ro-Ro (*Roll-in Roll-out*) y también los ferris rápidos para transporte de pasajeros.

# 1.2. MEJORAS EN LOS SISTEMAS DE PROPULSIÓN.

El desarrollo anteriormente comentado implica introducir ciertas mejoras en los sistemas de propulsión del barco. Se puede establecer una diferencia entre el sistema principal, encargado de mover el barco durante la marcha, y los sistemas auxiliares que ayudan a la maniobra.

En los sistemas principales estas mejoras han ido en dos direcciones. En primer lugar, los buques más pesados requieren sistemas más potentes, en el informe PIANC 180-2015 se analiza la evolución de dicha potencia.



Ilustración 2: Evolución de la potencia de los barcos con la capacidad de carga (curva roja). A la izquierda se encuentra el eje de potencia del sistema principal en kW, el eje horizontal representa la capacidad de carga en TEU (Twenty foot equivalent Unit o cantidad de contenedores estándar que puede transportar). La curva verde representa la evolución de la velocidad, que se mantiene en 25 nudos aproximadamente para grandes tamaños. Las divisiones en franjas por tamaño representan los diferentes tipos de barco (Feeder, Panamax, Post-Panamax, Suezmax y Post- Suezmax.

Por otra parte, ha habido cambios en la tipología de los sistemas, algunos de éstos permiten variar el azimut de las hélices para realizar giros o, directamente, sustituyen las hélices por jets producidos por bombas interiores.







Ilustración 3: A la izquierda se observa el sistema de propulsión principal del crucero "Harmony of the Seas" consistente en 3 azipods, a la derecha el sistema auxiliar de proa con 4 propulsores laterales. Imágenes tomadas de http://www.infocruceros.com/portadas/1140-asi-se-construye-el-harmony-of-the-seas-el-barco-de-cruceros-masgrande-del-mundo.

Entre las tipologías comúnmente empleadas se pueden citar las siguientes:

- *Fixed Pitch Propellers:* Se trata de hélices fijas en las que no puede variarse el ángulo de los álabes de la hélice, optimizado para el régimen de funcionamiento normal del barco.
- **Controllable Pitch Propeller:** el ángulo de los álabes puede variarse para conseguir mejor rendimiento en los diferentes regímenes de funcionamiento.
- Contra Rotating Propeller: Se emplean dos hélices alineadas que giran en dirección contraria, esto permite emplear dos hélices pequeñas en lugar de una grande con mayores cargas.
- **Ducted propellers:** Las hélices se rodean con un tramo de tubería para reducir las pérdidas de energía.
- **Azimuthal thrusters:** pueden girar alrededor del eje vertical, pudiendo por tanto dirigir el empuje hacia diferentes direcciones. Pueden ir también confinados en tuberías o no, también hay sistemas dobles con los que se evita la necesidad de timón.
- Otros sistemas: tecnologías como los propulsores a jet y cicloidales.

Entre las mejoras en sistema principal cabe destacar el empleo de propulsión a chorro (jets) que se ha aplicado especialmente en barcos que pretenden competir en tiempos de transporte con los medios terrestres (ferris y barcos Ro-Ro fundamentalmente). Estos sistemas generan un jet que puede dirigirse en la dirección deseada, durante las maniobras de atraque y desatraque la velocidad del barco se controla dirigiendo el chorro hacia el fondo, de forma que se reduce la velocidad de avance manteniendo el régimen de funcionamiento del motor.

Además, el desarrollo del sistema principal va acompañado por la aparición de sistemas auxiliares que, fundamentalmente, consisten en propulsores laterales situados en la proa o popa del barco, estos propulsores generan chorros laterales que permiten al barco girar sobre su propio eje sin depender de remolcadores. La principal ventaja de su uso está en que agilizan las maniobras del barco y reducen la dependencia en barcos remolcadores.

# 1.3. EL PROBLEMA DE LA SOCAVACIÓN INDUCIDA.

Todas las mejoras comentadas anteriormente generan nuevos problemas en las infraestructuras al erosionar diferentes zonas del fondo de las dársenas. Los sistemas principales al ser más potentes producen mayores tensiones tangenciales en el fondo, movilizando el sedimento. Por otra parte, los sistemas laterales actúan directamente contra los muelles, produciendo un efecto de lavado de material en su base, otro punto donde generan problemas es en las juntas entre





bloques que existen en ciertas tipologías. Los sistemas de propulsión a chorro, como se ha comentado, se dirigen hacia el fondo en las maniobras por lo que tienen un gran poder de socavación.



Ilustración 4: Maniobra de atraque en buques Ro-Ro propulsados por jet. Imagen tomada del informe PIANC 180-2015.

En las siguientes ilustraciones, tomadas de PIANC Report 180-2015, se detallan algunos posibles casos de erosión producida por maniobras y zonas afectadas.



Ilustración 5: Posibles zonas afectadas por erosión.

Las estructuras portuarias pueden ser de diferentes tipologías, los posibles modos de fallo relacionados con la socavación inducida por los sistemas de propulsión dependen de dicha tipología, en este sentido se pueden clasificar los muelles en estructuras sólidas (muros, pantallas de tablestacas, etc.) y abiertas (estructuras soportadas por pilotes). Los posibles modos de fallo se exponen a continuación.

En estructuras sólidas los fallos se producen por pérdida de la presión pasiva del suelo que tiende a estabilizarlas frente a la acción del empuje activo del trasdós, facilitando el vuelco o desplazamiento del muelle. Por otra parte, si se trata de tablestacas, el empotramiento en el suelo determina el punto de inflexión de la deformada de la estructura, de modo que si este punto es más profundo la deformación es mayor. Si se pierde gran cantidad de suelo es posible que este empotramiento desaparezca cambiando el esquema estático a una ménsula y permitiendo la salida de material del trasdós por debajo de ella. En los casos anteriores la movilización de material del trasdós provoca el hundimiento de la estructura superior.







Ilustración 6: Modos de fallo relacionadas con la socavación en estructuras sólidas. Imágenes tomadas del informe PIANC 180-2015.

En lo referente a estructuras abiertas el punto crítico es el talud sobre el que se cimentan las pilas. La retirada del material al pie de este talud puede provocar el vuelco global de la estructura. La erosión puede provocar también el deslizamiento de la capa de protección de escollera. Otro posible modo de fallo consiste en el lavado del material en el que cimentan las pilas, esto provoca una pérdida de la fricción en el fuste y el consiguiente hundimiento. Finalmente, al igual que en las tablaestacas, el punto de empotramiento puede hacerse más profundo al erosionar material, en este caso se trata de barras sometidas a compresión por lo que el desplazamiento de este punto puede llevar a una esbeltez excesiva de las pilas y provocar el pandeo de las mismas.



Ilustración 7: Modos de fallo relacionados con la socavación en estructuras abiertas. Imágenes tomadas del informe PIANC 180-2015.

# 1.4. ALGUNOS CASOS DOCUMENTADOS.

Se exponen a continuación algunos casos de problemas de socavación debida a maniobras de barcos que se detectaron en puertos españoles.

# 1.4.1. Puerto de Motril (Granada)

Durante un estudio de la zona donde operan los buques Ro-Ro comunicando el puerto con Melilla, Alhucemas y Nador se detectó un problema de socavación, los estudios batimétricos mostraron una profundidad de la misma de hasta 3 metros. Las actuaciones consistieron en un dragado y disposición de protección frente a socavación en las cercanías de las rampas donde operan estos buques.

#### http://www.puertos.es/Memorias\_Anuales/2013/pdf/Motril/06\_ObrasPlanificacion.pdf

# 1.4.2. Puerto de Gijón (Asturias)

Se detectó una fisura a lo largo de un de los muelles destinado a operaciones de carga y descarga de mercancías pesadas. Se realizó una inspección submarina y se observó un descalce de la cimentación del muelle debido al lavado de material que produjo el funcionamiento de las hélices, con una profundidad de a socavación de hasta 2,5 metros. Como resultado de este





descalce, aproximadamente un tercio de la planta de los cajones había quedado sin apoyo. La solución que se aplicó fue rellenar el hueco con hormigón previo saneo de la zona.

https://www.puertogijon.es/inc/perfilContratante/descargaDoc.asp?idDocumento=22639

# 1.5. EL DISEÑO FRENTE A LA SOCAVACIÓN.

Para ser competitivos, los puertos deben ser capaces de adaptarse a los cambios en los barcos a los que dan servicio. En este sentido, será necesario diseñar las infraestructuras para que las estelas de las hélices de los barcos, cada vez más potentes, no provoquen socavaciones capaces de poner en riesgo la funcionalidad o estabilidad de los muelles. Un caso que genera especial interés en las autoridades portuarias es el de los cruceros: conseguir que un determinado puerto entre en los circuitos habituales de este tipo de barco supone unos ingresos importantes tanto para el puerto como para la ciudad en la que se encuentra. Sin embargo, este tipo de barcos es, como ya se ha comentado, uno de los que más problemas de socavación genera; por tanto, la aparición de un tráfico frecuente de cruceros puede provocar la aparición de daños importantes en la infraestructura del puerto si no está correctamente diseñado, lo cual supone una barrera operacional para los cruceros en dicho puerto. Otro caso de importancia son las líneas de ferry rápido, en las cuales se emplean sistemas de propulsión por chorro y dan problemas de socavación importantes en los muelles debido a la maniobra que realizan para el atraque.

La pregunta que surge entonces es cómo diseñar la infraestructura portuaria para evitar este tipo de problema y mantener el puerto dentro de los circuitos de cruceros o dando servicio a otros tipos de barco que lo puedan producir. Como se verá más adelante, los métodos empleados hasta ahora consisten en aproximaciones semi-empíricas que en casos complejos no parecen suficientemente precisas.

En los últimos años se han ido desarrollando una serie de herramientas de cálculo numérico, las cuales permiten resolver de forma aproximada ecuaciones complejas, como es el caso de las que gobiernan el comportamiento de un fluido (ecuaciones de Navier-Stokes). Entre estos métodos numéricos se encuentra la dinámica computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés) que consiste en la resolución de estas ecuaciones para analizar casos de gran complejidad. Sin embargo, el manejo de este tipo de herramientas es complejo y requiere validar los resultados obtenidos con pruebas experimentales, esto hace que los métodos de CFD sólo se empleen con frecuencia en estructuras complejas de ingeniería.

Teniendo en cuenta lo anterior, parece interesante una aproximación al complejo problema de la socavación provocada por hélices empleando CFD, ya que permitiría adaptar los cálculos a situaciones complejas como puede ser la interacción con pilotes, forma y distribución del muelle, etc.





# 2. ESTADO DEL ARTE.

# 2.1. CONCEPTOS GENERALES DEL FLUJO EN HÉLICES.

A la hora de hacer frente al problema de socavación inducida por hélices en primer lugar se deberá caracterizar el flujo generado por la hélice y, posteriormente, analizar cómo interactúa con el fondo. En W. Lam et al. (2011) se puede encontrar un buen resumen del conocimiento con el que se cuenta a cerca del flujo generado por hélices, obtenido a partir de razonamientos teóricos y pruebas experimentales. A continuación, se comentarán brevemente los conceptos fundamentales en los que se basan los distintos estudios y métodos de cálculo para la socavación inducida por hélices.

# 2.1.1. Flujo en hélices y flujo en jets (chorros).

En primer lugar, es importante establecer las diferencias entre la estela de una hélice y la de un chorro o jet, en el caso de la hélice se generan velocidades con componente axial, tangencial y radial, mientras que en el jet sólo hay componente axial.



Ilustración 8: Prueba de una hélice en túnel de cavitación, se puede observar en el patrón de las burbujas la existencia de velocidad tangencial. Imagen tomada de la página web de Krylov State Research Centre.

Sin embargo, algunos descubrimientos derivados del estudio del jet plano, como Albertson et al (1950), son aplicables al de las hélices. Uno de los resultados importantes de estas investigaciones es la distinción entre dos zonas de flujo, la zona de establecimiento de flujo y zona de flujo establecido, en la primera zona el núcleo de la estela tiene flujo laminar (*potential core*) que va disminuyendo en tamaño hasta que desaparece en la zona de flujo establecido.



Ilustración 9: Esquema del flujo generado por un jet plano a la izquierda y por una hélice a la derecha (se representa sólo la componente axial de la velocidad). Imágenes tomadas de W. Lam et al.





En las ilustraciones anteriores se observa cómo, en el inicio de la estela (orificio de salida del jet), la zona afectada por el jet es muy estrecha, por fenómenos de difusión y convección la estela se va ampliando debido al transporte de cantidad de movimiento del interior al exterior de la estela y, por conservación de cantidad de movimiento, al aumentar la zona afectada por la estela la velocidad en su interior debe disminuye.

A partir de  $V_0$  (velocidad del jet en el orificio de salida) se puede calcular la velocidad a cualquier distancia de la hélice (x) y en cualquier posición radial (r) respecto al eje axial con la siguiente fórmula propuesta por Albertson:

$$V_{x,r} = A\left(\frac{D_p}{x}\right)^a V_0 e^{\left(-\frac{1}{2C_2}\frac{r^2}{x^2}\right)} f$$

Para la obtención de esta expresión se tomaron las siguientes hipótesis:

- Distribución de presiones hidrostática.
- Proceso de difusión dinámicamente similar en todas las condiciones.
- La componente longitudinal de la velocidad en la zona de difusión varía siguiendo una función Gaussiana en todas las secciones.

#### 2.1.2. Determinación de la velocidad de salida y teoría del disco actuador.

Uno de los métodos empleados comúnmente para la caracterización del flujo de hélices desde un punto de vista teórico consiste en suponer un comportamiento de la componente axial de las velocidades similar al de los jets, fijando como velocidad de salida ( $V_0$ ) la obtenida mediante la teoría del disco actuador. Ésta consiste en una simplificación del flujo en el entorno de una turbomáquina en la que se la sustituye por un disco actuador, el cual aporta energía al fluido en el caso de una hélice. Las hipótesis que se realizan al aplicar la teoría del disco actuador simple (*Axial Momentum Theory*) son:

- La hélice se representa mediante un disco de diámetro equivalente.
- Tiene un número infinito de álabes rotando a una velocidad infinita.
- El espesor del disco es despreciable.
- El disco está inmerso en un fluido ideal y sin perturbaciones.
- Todas las partículas que atraviesan el disco sufren un incremento de presión igual.
- La energía aportada al disco pasa al fluido sin inducir efectos de rotación (sólo se genera velocidad en dirección axial).

Si, aplicando esta teoría, se analiza la evolución de la velocidad del fluido a lo largo del eje axial, se observa que antes de llegar al disco actuador ya se acelera debido a que, por conservación de masa, no pueden existir cambios bruscos en la velocidad. En cuanto a la presión, se produce una disminución aguas arriba del disco y un aumento aguas abajo, existiendo un salto en la posición del disco. En la ilustración siguiente se puede observar el comportamiento del flujo supuesto por este método, así como la evolución de presión y velocidad a lo largo del eje axial.







Ilustración 10: Teoría del disco actuador, evolución de la velocidad y presión en el eje axial. Imagen tomada de W. Lamb et. Al.

La velocidad de salida, denominada *efflux velocity* ( $V_0$ ), que es la velocidad máxima en dirección axial que se genera en el plano de salida del jet o el plano de rotación de la hélice para una distribución promediada en el tiempo. Aplicando la teoría del disco actuador y la conservación de energía (teniendo en cuenta la aportada por la hélice) se llega a la siguiente expresión:

$$V_0 = \alpha n D \sqrt{C_t}$$

Donde  $\alpha$  es un coeficiente de valor teórico 1,59, n es la velocidad de giro de la hélice, D es su diámetro y  $C_t$  es el coeficiente de empuje (*thrust*). Esta velocidad de salida se puede emplear junto con la fórmula de Albertson para determinar la velocidad en distintos puntos de la estela.

Estas dos aproximaciones (jet plano y *axial momentum theory*) se han aplicado en la obtención de fórmulas para caracterizar el flujo en hélices. Sin embargo, existen diferencias notables entre estas dos simplificaciones y la realidad; el caso del jet plano dista de la situación de la estela generada por una hélice ya que en ésta existen componentes axial y tangencial la velocidad que desempeñan un papel importante en la difusión de cantidad de movimiento, además, las hipótesis que se toman en la teoría del disco actuador no son razonables para este caso como se explica en Hamil et. al. (2004). Por este motivo, es necesario realizar modificaciones sobre las ecuaciones que se obtienen con las aproximaciones anteriores mediante el uso de coeficientes correctores, que se han determinado empíricamente en distintos estudios como o Blaaw y van de Kaa (1978) o Hamil (1987). Estas correcciones se expondrán más adelante con los distintos métodos de cálculo.

En la actualidad se dispone de métodos más avanzados para el análisis del funcionamiento de hélices que permiten estimar con mayor precisión el flujo generado por las mismas. Entre los más empleados destaca el método BEMT (*Blade Element Momentum Theory*), que consiste en discretizar el disco actuador en una serie de anillos y calcular en cada uno la fuerza ejercida en dirección axial y tangencial sobre el fluido, considerando estas fuerzas como una fuente de cantidad de movimiento se puede determinar el campo de velocidades inducido. La principal ventaja de este método es que evita varias de las suposiciones que se hacen en la teoría de disco actuador más simple, en este caso se considera una distribución radial no uniforme de la velocidad axial y tangencial (esta última en el caso simple no se tenía en cuenta) y se tienen en cuenta las características hidrodinámicas de los álabes (coeficientes de sustentación y arrastre,





variación radial de *pitch* y cuerda, etc.); la desventaja principal es que se trata de un método iterativo, por lo que no se emplea en ecuaciones analíticas para caracterizar el flujo.

# 2.1.3. Parámetros básicos de los álabes de una hélice.

Como se explicó anteriormente, algunos métodos para calcular la velocidad de salida de la hélice tienen en cuenta la configuración de los álabes de la hélice. Para facilitar la comprensión de estos métodos, que se explicarán más adelante, comentan brevemente los principales parámetros de los álabes de una hélice que se van a tener en cuenta.

• *Pitch*: ángulo que forma el álabe con el plano de referencia (normalmente el de rotación). Las hélices suelen tener *pitch* variable para compensar el cambio de la velocidad relativa incidente (cuanto más lejos está la sección del centro mayor va a ser la velocidad tangencial respecto a la axial, por lo que el ángulo de incidencia aumenta si se mantiene el *pitch* constante).



Ilustración 11: Ángulo de pitch en un perfil. Imagen tomada de http://encyclopedia2.thefreedictionary.com

• Cuerda (*chord*): longitud de la línea que une los extremos de entrada y salida de un perfil. El *camber*, por otra parte, es la línea media del perfil.



Ilustración 12: Cuerda y camber line en un perfil. Imagen tomada de http://www.wikiwand.com/en/Wingsail

Fuerzas actuantes sobre un perfil: Si se toma como referencia la dirección del vector de velocidad relativa sobre el perfil, resultado de componer las componentes axial y tangencial de la velocidad, actuarán una fuerza en sentido contrario al movimiento del álabe (arrastre o *drag*) y otra en la dirección perpendicular (sustentación o *lift*). Si se fija como sistema de referencia el plano de rotación se tendrá una fuerza contenida en el plano que, multiplicada por la distancia al eje, genera el torsor o *torque* y una fuerza en dirección perpendicular al plano que es el empuje o *thrust*. Notar que, en una hélice, interesa conseguir el mayor empuje con el menor torsor posible aplicado sobre el eje, ya que este último deberá compensarse con un aporte de potencia del motor. En el caso de una turbina sucede lo contrario, interesa el máximo torsor para generar potencia en el alternador mientras que el empuje deberá ser resistido en última instancia por la estructura (la pila y cimentación de un aerogenerador, por ejemplo).







Ilustración 13: Fuerzas actuantes sobre los álabes de una hélice y triángulo de velocidades incidentes. Imagen tomada de http://s6.aeromech.usyd.edu.au/aerodynamics/

Las fuerzas de *lift* y *drag* generadas por un perfil se obtienen con los coeficientes de *lift* y *drag* para cualquier velocidad incidente, estos coeficientes se obtienen de forma experimental y están tabulados para las diferentes series de perfiles, como la serie NACA, en función del ángulo de ataque (ángulo que forma la cuerda del perfil con el vector de velocidad incidente). En la imagen siguiente se muestran gráficas con resultados de distintos ensayos donde se relaciona el coeficiente de *lift* con el ángulo de ataque y con el coeficiente de *drag*.



Ilustración 14: Relación entre coeficiente de lift, coeficiente de drag y ángulo de ataque para el perfil NACA 0012. Imagen tomada de https://turbmodels.larc.nasa.gov/naca0012\_val.html

# 2.2. APROXIMACIONES AL PROBLEMA.

# 2.2.1. El análisis de socavación inducida por hélices.

En un estudio de la socavación inducida por hélices en el diseño o adaptación de infraestructura portuaria, se pueden emplear expresiones simplificadas provenientes de estos modelos matemáticos modificadas con coeficientes empíricos. Éste sería un enfoque ingenieril del problema y emplearía formulación semi-empírica con amplio rango de aplicación, sin embargo, hay que tener en cuenta que los principios en los que se basa no son completamente aplicables y, por tanto, la precisión de los resultados estará condicionada por este motivo.

Otra posible solución para analizar el flujo generado por la hélice y su interacción con el fondo es la realización de experimentos. Este es un enfoque más científico que proporciona mayor precisión, aunque el coste para realizarlos tanto en tiempo como en dinero son elevados. Los resultados de estos experimentos se traducen en fórmulas empíricas con un determinado rango de aplicación que habrá que tener en cuenta a la hora de emplearlas.





A continuación, se comentan algunos de los métodos disponibles en la bibliografía para el análisis del problema de socavación. Como se indicó anteriormente, los métodos pueden dividirse entre los que se basan en el enfoque ingenieril, empleando formulación semi-empírica, y los de un enfoque científico donde se emplean fórmulas empíricas derivadas de experimentación. Es importante tener en cuenta que el enfoque científico ha posibilitado la obtención de las fórmulas y coeficientes que se aplican en los manuales de enfoque ingenieril, como es el caso de algunas de las publicaciones que se tratan en el apartado de enfoque científico de este trabajo.

#### 2.2.2. Ingenieril.

Desde el punto de vista ingenieril, se puede recurrir al informe PIANC 180-2015 donde se trata con detalle el problema de la socavación en estructuras portuarias. Otra posibilidad es emplear las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) en las que también se incluye el aspecto de socavación generada por hélices.

El proceso de análisis consiste en determinar inicialmente la velocidad generada en el fondo empleando los modelos simplificados de flujo. Partiendo de este resultado se podrán diseñar diferentes métodos de protección o estimar la máxima profundidad que alcanzará la socavación (para realizar posteriormente un análisis de estabilidad de la estructura del muelle afectada por la socavación, por ejemplo).

Los datos de partida para la aplicación del método pueden ser difíciles de conseguir de forma precisa, por lo que se suele recurrir a su estimación. En ambos documentos se puede encontrar información suficiente para este propósito.

# 2.2.2.1. INFORME PIANC 180-2015: GUIDELINES FOR PROTECTING BERTHING STRUCUTRES FROM SCOUR CAUSED BY SHIPS.

En primer lugar, se proporcionan gráficos que permiten estimar los datos de partida para calcular, como son la potencia y diámetro de los sistemas de propulsión en función del tamaño del barco. El paso siguiente consiste en la obtención de las velocidades generadas por los sistemas de propulsión, se tratan por separado el sistema principal y el auxiliar ya que las condiciones del flujo son diferentes. Se presentan dos métodos, derivados de las ecuaciones desarrolladas por Albertson, comentadas anteriormente, que son *German method* y *Dutch Method*. Las ecuaciones incluyen los coeficientes correctores que las hacen aplicables al problema. Además, se tratan casos especiales como la propulsión por jets o casos con varias hélices/jets. El siguiente diagrama, similar al proporcionado en el informe, se resume el procedimiento:







Estas fórmulas sin embargo sólo son aplicables en hélices abiertas (no aplicable en *ducted propellers*) y sin restricciones por profundidad. Esto unido a las imprecisiones en las simplificaciones que permitieron obtener estas expresiones hacen que no sean válidas para tratar el problema de la socavación cerca de muelles.

En el informe se presentan dos métodos que sí son aplicables a estas situaciones. En cada uno, dependiendo del tipo de estructura, se aplican unas ecuaciones u otras. El caso básico es el del muelle vertical, en caso de que la estructura forme un talud cada método propone modificaciones para adaptar las ecuaciones del muelle vertical. Se debe tener en cuenta que cada método propondrá posteriormente una formulación para el cálculo de la protección, que deberá realizarse con el mismo método que se emplee para el de las velocidades.



En primer lugar, los métodos tratan el caso de los propulsores laterales (sistema auxiliar).

Ilustración 15: Esquema del flujo generado por propulsores laterales. Imagen tomada del informe PIANC 180-2015.

German Method: desarrollado por Fuehrer, Römisch y Engelke en 1981 y Schimidt en 1998. Considera una separación en las dos zonas de establecimiento de flujo y de flujo establecido comentadas anteriormente, cuya división está a una distancia de 1,9 veces el diámetro del propulsor lateral. Para distancias menores se considera válida la formulación de V<sub>0</sub> derivada de la aplicación de *axial momentum theory* y conservación de la energía, para distancias mayores se aplica un factor que la disminuye cuanto mayor es la distancia debido a la expansión de la estela.

$$V_{axis,thruster} = V_0 \quad para \frac{x}{D_{thruster}} < 1.9$$
$$V_{axis,thruster} = 1.9 V_0 \left(\frac{x}{D_{thruster}}\right)^{-1} \quad para \frac{x}{D_{thruster}} > 1.9$$

La velocidad en el fondo generada a pie del muelle se puede calcular directamente con la expresión siguiente:

$$\frac{V_{bottom,thruster}}{V_0} = a_L \ 1.9 \ \left(\frac{L}{D_{thruster}}\right)^{-1}$$

Donde L es la distancia entre la salida del flujo del propulsor y la estructura del muelle y  $a_L$  es un coeficiente que depende de la distancia vertical entre el eje del propulsor y el fondo dado por la gráfica siguiente:







Ilustración 16: Gráfico para determinación del coeficiente  $a_L$ . Imagen tomada del informe PIANC 180-2015.

Si se trata de un muro inclinado o en talud, el método permite determinar la velocidad a pie de talud aplicando un coeficiente reductor (cuanto más inclinado está menor parte del jet irá hacia el pie del talud). El valor de este coeficiente está graficado para las diferentes inclinaciones siendo 1 para un muro vertical y 0 para 90 grados de inclinación respecto a la vertical.



Ilustración 17: Esquema del flujo en muelles con paramento inclinado y gráfica para obtención del coeficiente reductor por inclinación. Imágenes tomadas del informe PIANC 180-2015.

• **Dutch Method:** se basa en las investigaciones de Blaaw y Van de Kaa en 1977, Vertheij en 1983 y Blokland en 1996 y 1997. Da las siguientes expresiones para la velocidad en el fondo, se empela una u otra dependiendo de la relación entre distancia al muelle y altura del propulsor:

$$V_{b,max} = V_0 \frac{D_{thruster}}{h_{thruster}}$$
 para  $\frac{L}{h_{thruster}} < 1.8$ 

$$V_{b,max} = 2,8 V_0 \frac{D_{thruster}}{L + h_{thruster}} \quad para \ \frac{L}{h_{thruster}} \ge 1,8$$

Se puede observar la misma división en dos zonas del método anterior, aunque en este caso se aplica directamente al cálculo de la velocidad en el fondo.

En este método los muelles con cierta inclinación se calculan de igual modo, pero la distancia a la que se calcula no es L si no Xv.max, distancia a la que se produce la máxima velocidad, calculada con la expresión siguiente:

$$\frac{X_{Vmax}}{L} = K\left(\sqrt{1 + \frac{2}{K}} - 1\right)$$







Ilustración 18: Flujo en caso de muelles inclinados. Imagen tomada de informe PIANC 180-2015.

Para el cálculo del flujo generado por el sistema principal se emplean también estos dos métodos, pero con formulaciones diferentes:



Ilustración 19: flujo generado por el sistema de propulsión principal. Imagen tomada de PIANC 180-2015.

• **German Method:** En el sistema de propulsión principal se tiene en cuenta únicamente el caso del muelle vertical. Al igual que en el caso del propulsor transversal se divide la estela en diferentes partes para calcular la velocidad en el eje.

$$V_{axis} = V_0 \quad en \ la \ zona \ de \ establecimiento \ de \ flujo \ \frac{x}{D_p} < 2,6$$
$$V_{axis} = 2,6 \ V_0 \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-1} \quad en \ la \ zona \ de \ propagacion \ del \ jet \ \frac{x}{D_p} > 2,6$$
$$V_{axis} = A \ V_0 \left(\frac{x}{D_p}\right) \quad en \ la \ zona \ de \ propagación \ restringida$$

Donde:

$$A = 1,88 e^{-0,092\left(\frac{h}{D_p}\right)} \quad sin \ tim \acute{o}n \ central$$
$$A = 1,88 e^{-0,061\left(\frac{h}{D_p}\right)} \quad con \ tim \acute{o}n \ central$$





Nuevamente se realiza la división en zona de establecimiento de flujo y de flujo establecido. Se añade una nueva que no se contemplaba inicialmente en el estudio del jet plano, que es la zona en la que la estela entra en contacto con el fondo. La separación entre zonas y los coeficientes son distintos a los de propulsores laterales debido a que la propulsión principal tiene un comportamiento propio de las hélices mientras que los propulsores laterales, al estar dentro de toberas, se asemejan más al caso del jet plano.

Se puede obtener también la velocidad en posiciones diferentes al eje axial con la siguiente expresión:

$$V_{x,r} = V_{axis} e^{-22,1\frac{r^2}{x^2}}$$

Y la máxima velocidad en el fondo con las siguientes expresiones:

$$V_{b max} = EV_0 \left(\frac{h_p}{D_p}\right)^{-1}$$

Donde

E=0,71 para buques con timón.

E=0,42 para buques sin timón.

E=0,25 para barcos de navegación interior.

En cualquier caso, la velocidad máxima en el fondo deberá ser menor que  $V_0$ .

Si el sistema de propulsión consta de dos hélices se puede emplear la siguiente expresión:

$$V_{b max} = E_{twin.} V_0 \left(\frac{h_p}{D_p}\right)^{-0.275}$$

Si se cumple  $0.9 < \frac{h_p}{D_p} < 3.0$  y empleando como valores de  $E_{twin.}$  0,42 con timón central o 0,52 si tiene doble timón.

 Dutch Method: Proporciona ecuaciones para velocidad en el eje axial, para diferentes posiciones radiales y para la velocidad en el fondo.

$$V_{axis} = (2,0 \sim 2,8)V_0 \frac{D_p}{x}$$
$$V_{x,r} = V_{axis} e^{-15,4} \frac{r^2}{x^2}$$
$$V_{b max} == (0,2 \sim 0,3)V_0 \frac{D_p}{h_p}$$

Finalmente, se incluyen indicaciones para calcular con otros sistemas de propulsión menos comunes como los jets.

La siguiente fase del procedimiento es determinar la profundidad y extensión de la zona afectada por la socavación, como se indicó anteriormente es importante emplear el mismo método en el cálculo en todas las fases del procedimiento. Para calcular la zona afectada, según los datos de partida disponibles, se podrá realizar un análisis determinista o probabilista, esto se debe a que los datos de partida, como la velocidad de giro de la hélice, no son fijos.





El método de cálculo depende del tipo de fondo (cohesivo o no cohesivo) y del tipo de estructura del muelle (abierta o cerrada). A continuación, se resumen los métodos expuestos en el informe para estructuras cerradas. Se tratan por separado los propulsores laterales y los principales ya que las condiciones hidrodinámicas y la interacción de las mismas con el fondo son diferentes.

En el caso de los propulsores laterales se tienen los siguientes casos:

• Fondo no cohesivo: Las ecuaciones siguientes fueron desarrolladas por Schimidt y modificadas en 2004 por Römisch:

$$\frac{S}{D_{85}} = C_m 0.1 \left(\frac{B}{B_{cr}}\right)^{1.3} \quad para \ 1.0 \le \frac{B}{B_{cr}} \le 1.4$$
$$\frac{S}{D_{85}} = C_m 4.6 \left(\frac{B}{B_{cr}}\right)^{2.25} \quad para \ 1.4 \ge \frac{B}{B_{cr}}$$

Donde *S* es la profundidad máxima de la socavación en situación de equilibrio,  $B_{cr} = 1,2, B = \frac{V_{bottom,thruster}}{\sqrt{D_{85}g\Delta}}, \Delta$  es la densidad relativa  $\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w}$  y  $C_m = 0,3$  para las maniobras de atraque. La velocidad generada por el propulsor en el fondo se puede calcular con la formulación anteriormente descrita.

• Fondo cohesivo: Los métodos de cálculo disponibles en el informe se limitan a las arcillas. Se trata de un caso de mayor complejidad en el que la velocidad crítica (necesaria para que comience el proceso de socavación) varía en función de la composición y grado de consolidación del fondo. Las condiciones de turbulencia del flujo también son importantes en este caso. En el informe se proporcionan resultados de velocidad crítica para diferentes tipos de fondo y distintas condiciones de turbulencia. Dadas las velocidades críticas se calcula la profundidad máxima empleando las ecuaciones descritas anteriormente, de modo que la velocidad generada sea igual a la crítica.

Para los sistemas principales de propulsión se observó la existencia de una expresión válida para diferentes tipos de suelo donde su influencia viene dada por el parámetro  $D_{85}$ .

$$\frac{S}{D_{85}} = \frac{h_p}{D_{85}} C_{ad} C_{m,r} \left( a_\alpha \frac{B}{B_{crit}} - 1 \right)$$

Donde  $a_{\alpha} = 0,65$ ,  $C_{m,r}$  es un coeficiente que tiene en cuenta la posición del timón del barco, vale de 0,3 a 0,44 para ángulos de 0º a 40º respectivamente y 1 para situaciones estacionarias.  $C_{ad}$  tiene la expresión siguiente:

$$C_{ad} = 17 \left(\frac{h_p}{D_{85}}\right)^{-1} + \left(0.9 \frac{B}{B_{crit}} - 1\right) \le 1$$

La expresión anterior el también válida para suelos de granulometría no homogénea, se observa que la profundidad máxima de socavación depende fundamentalmente del tamaño de las partículas más grandes del suelo en el caso de suelos mixtos.

Finalmente, en caso de no ser admisible la profundidad máxima de socavación, se deberá disponer algún método de protección del fondo para evitar su erosión. Para calcular dicha protección se puede recurrir a alguno de los métodos propuestos en el informe (*German* o





*Dutch*) para protecciones con material granular, debiendo mantenerse el seleccionado para calcular la velocidad (se advierte de la posibilidad de errores importantes si se cambia de método). Otra opción es utilizar placas o losas de hormigón.

En el caso de protección con material granular se tienen los dos métodos anteriores:

• *German Method:* Se basa en la siguiente ecuación de estabilidad:

$$V_{crit} = B_{crit} \sqrt{D_{85}g\Delta}$$

Donde  $B_{crit} = 0.95 \sim 1.25$ . El cálculo consistirá en determinar las características del material de protección ( $D_{85}$  y densidad) de modo que la velocidad crítica, a partir de la cual se moviliza el material, sea superior que la generada en el fondo por el sistema de propulsión (calculada anteriormente).

• **Dutch Method:** Se proporcionan dos ecuaciones que permiten determinar las características del material. En primer lugar, la ecuación de Izbash:

$$\Delta D_{50} = \frac{1}{B_{crit,Iz}^2} \frac{V_{bottom}^2}{2g}$$

Donde  $B_{crit,Iz}$  es aproximadamente 0,8 y siempre menor de 1,2.

En segundo lugar, la ecuación de Pilarczyk. Más compleja y aplicable a otros tipos de protección (no sólo con material granular) aunque no ha sido validada para el caso de flujo generado por hélices y formas de protección distintas a la de material rocoso (por lo que debe emplearse con cuidado y contrastar los resultados con los historiales de funcionamiento del medio de protección seleccionado. Es similar a la anterior, pero incluye coeficientes para tener en cuenta la turbulencia, ángulo del talud, perfil de velocidades y características geométricas.

$$\Delta D = \phi \frac{0.035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} \frac{k_t^2 V^2}{2g}$$

Donde  $\Delta$  es la densidad relativa, D la dimensión característica, V la velocidad media de la distribución,  $\phi$  el parámetro de estabilidad,  $\psi_{cr}$  el parámetro de Shields,  $k_{sl}$  el parámetro del talud,  $k_t$  el factor de turbulencia y  $k_h$  el parámetro de profundidad (valor recomendado 1). La dimensión característica puede referirse a diferentes parámetros dependiendo del tipo de protección, en el caso de material granular se refiere a su diámetro, en bloques de hormigón a su espesor, en mallas de elementos de hormigón se refiere a su espesor.

Se incluyen tablas para determinar los parámetros de la formula anterior, como el de estabilidad o el número de Shields. Para el factor de turbulencia también se dan valores tipos, en caso de conocer la intensidad de turbulencia relativa <sup>®</sup> se recomienda calcularlo con la siguiente fórmula:

$$k_t = \frac{1+3r}{1,3}$$

El parámetro de talud expresa la relación entre el ángulo de fricción interna del material  $(\theta)$  y el del talud de la protección  $(\alpha)$  de la siguiente forma:





$$k_{sl} = \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \theta}\right)^2}$$

Aunque *Dutch Method* se puede aplicar para protecciones mediante bloques o mallas de hormigón, no está validado para estos casos. Por este motivo, se da un método concreto para el cálculo de estos tipos de protección. El cálculo consiste en un equilibrio de fuerzas entre la sustentación de los bloques o placas generada por el flujo de la hélice y el peso sumergido de los mismos, siempre que el segundo sea superior al primero los elementos serán estables. La fuerza de sustentación puede obtenerse integrando la diferencia de presión entre las caras superior e inferior del bloque ( $\Delta p$ ) que se supondrá constante en toda la superficie, de este modo:

$$F_{sust} = S\Delta p = SC_L \frac{\rho_w V_{bottom}^2}{2}$$

Siendo  $C_L$  el coeficiente de sustentación, que puede considerarse igual al parámetro de estabilidad de la formulación de Pilarczyk, también se propone el valor de 0,5 para zonas continuas de la protección.

Y la condición de estabilidad será entonces:

$$C_L \frac{\rho_w V_{bottom}^2}{2} \le (\rho_s - \rho_w) g D$$

Donde *D* es el espesor de los bloques, placas, o mallas.

#### 2.2.2.2. RECOMENDACIONES DE OBRAS MARÍTIMAS (ROM).

El procedimiento de cálculo propuesto en la ROM es similar al del informe PIANC 180-2015, en primer lugar, se calcula la velocidad generada en el fondo por la acción de las hélices y, posteriormente, se calcula la protección necesaria para evitar el fallo. Las dos fases del cálculo se encuentran en diferentes tomos, el cálculo de la velocidad generada se incluye en ROM 2.0-11 (Recomendaciones para Proyecto y Ejecución de Obras de Atraque y Amarre) mientras que el cálculo de la protección se encuentra en ROM 0.5-0.5 (Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias).

El cálculo de la velocidad generada en el fondo se incluye en el punto 4.6.4.4.5 de ROM 2.0-11 (Corriente generada por hélices y otros equipos de propulsión y maniobra de los buques). Las fórmulas que se proporcionan se basan en admitir una distribución de velocidades normal cuando el flujo no está confinado, aplicando coeficientes correctores obtenidos experimentalmente para adaptarlas a los casos en que sí exista confinamiento. El modelo matemático que se emplea para el cálculo es similar al desarrollado por Albertson:







Ilustración 20: Esquema de flujo producido por el sistema principal de propulsión y notación empleada por la ROM. Imagen tomada de ROM 2.0-11.

Se tendrá en cuenta además una componente turbulenta de la velocidad que tendrá un valor variable y aleatorio, se incluye su efecto incrementando la velocidad máxima teórica por un factor de turbulencia  $F_T$  para el que se propone un valor de 2.

$$V_{c\acute{a}lc.} = F_T V_{m\acute{a}x fondo}$$

Donde  $V_{max fondo}$  se obtiene de formas distintas para el sistema de propulsión principal y el auxiliar.

En el caso del sistema principal se emplea:

$$V_{m \acute{a}x \ h \acute{e} lices, fondo} = C_1 C_2 \overline{V_0} \frac{D_0}{h_h}$$

Siendo  $D_0$  el diámetro del chorro en la zona de máxima contracción,  $h_h$  la distancia vertical entre el eje de la hélice y el fondo,  $C_1$  es el coeficiente corrector por el efecto de confinamiento ejercido por el fondo para el que se obtuvo experimentalmente un valor de 0,4,  $C_2$  es el factor de confinamiento ejercido por la obra de atraque, toma un valor de 1,1 si el atraque es paralelo a la obra y 1,2 si es perpendicular (atraque de popa),  $\overline{V_0}$  es la velocidad de salida del chorro que se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$\overline{V_0} = 1,17 \sqrt[3]{\frac{P}{\rho_w D_0^2}}$$

Siendo P la potencia del sistema de propulsión empleada en el atraque (por lo general no se emplea la máxima potencia excepto en ferris y ro-ro).







Ilustración 21: Geometría para el cálculo de flujo generado por el sistema principal. Imagen tomada de ROM 2..0-11.

Para el sistema auxiliar (propulsores laterales) la formulación es la siguiente:

$$V_{max\ helices, fondo} = C_3 \overline{V_{0, trans.}} \frac{D_0}{l_h + h_h} \qquad para\ \frac{l_h}{h_h} \ge 1.8$$

En este caso  $D_0$  es el diámetro de la boca del túnel en el que se encuentran las hélices transversales,  $h_h$  es la distancia vertical entre el eje de las hélices transversales y el fondo,  $l_h$  la distancia horizontal a la altura del eje de las hélices entre la salida del túnel y el paramento vertical de la obra de atraque,  $C_3$  es el factor de confinamiento para esta configuración para el cual se obtuvo un valor experimental de 2,8 y  $\overline{V_{0,trans.}}$  es la velocidad del chorro en la boca del túnel, que se calcula con una fórmula similar a la del sistema principal:

$$\overline{V_{0,trans.}} = 1,17 \sqrt[3]{\frac{P_{h.trans.}}{\rho_w D_0^2}}$$

En este caso la potencia es la empleada en la maniobra por la hélice transversal, como diámetro se emplea el de la boca del túnel.



Ilustración 22: Geometría para el cálculo del flujo generado por el sistema auxiliar. Imagen tomada de ROM2.0-11.

Del mismo modo que en el informe del PIANC se reconoce la dificultad de obtener datos precisos sobre previsiones del tipo de barco que va a utilizar la obra de atraque y sus características





(potencia, dimensiones de la hélice principal, del sistema auxiliar, etc.). Se pueden realizar por tanto estudios deterministas o probabilista en función de los datos con los que se cuente.

Una vez se conoce la velocidad en el fondo se procede a calcular la protección necesaria. Para esto se acude a ROM 0.5-05 que trata sobre geotecnia en obras marítimas. Entre otros aspectos se tratan los diferentes modos de fallo geotécnicos en cada tipología de estructura (muelles de gravedad, de pilotes, de tablestacas o grupos de tablestacas), entre estos modos de fallo se encuentra el debido a la socavación. La formulación es distinta en cada tipología, sin embargo, todas consisten en calcular el diámetro del material de protección para que resista las velocidades anteriormente calculadas, las fórmulas más importantes son las del muelle de gravedad y el de pilotes.

• **Muelles de gravedad:** se proporciona la tabla siguiente, donde se recogen los tamaños mínimos para cada velocidad.

U <sub>b</sub> (m/s)	D <sub>50</sub> (m)
1	0,05
2	0,20
3	0,40
4	0,70
5	1,10
6	1,60

Donde  $U_b$  es la velocidad en el fondo, anteriormente calculada. Cabe destacar que esta tabla es aplicable para socavación producida por otros motivos como el oleaje o las corrientes marinas.

Es posible determinar la profundidad máxima a la que puede llegar la socavación con la siguiente expresión:

$$Z_{max} = \frac{1}{250} \left( \frac{F_0}{H_p / D_0} \right)^{2,9} H_p$$

Donde  $Z_{max}$  es la profundidad máxima que puede alcanzar la socavación,  $H_p$  es la distancia vertical entre el eje de la hélice y el fondo,  $D_0$  el diámetro de la hélice y  $F_0$  es el número de Froude densimétrico:

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{gD_s(G-1)}}$$

Siendo  $D_s$  el diámetro representativo de las partículas del suelo (usualmente  $D_{50}$ ) y G su peso específico.

En la reocmendación se indica que, en caso de que la profundidad máxima de socavación sea suficientemente pequeña, se puede evitar disponer protección; sin embargo esta decisión tiene que estar debidamente justificada.

• **Muelles de pilotes:** Se propone la siguiente fórmula para calcular el tamaño de escollera de protección:

$$D_{50} \ge h \left[ \frac{U_b}{B \sqrt{K \, \Psi g (G-1) h}} \right]^{2,5}$$





Donde *B* es un número adimensional que depende de la turbulencia del flujo (6 para flujo turbulento, 7-8 para flujo normal y 8-10 para poco turbulento),  $\Psi$  es un parámetro que depende del comportamiento que se pretenda en el material de protección (0,03 sin movimiento de piezas, 0,04 si se permite el inicio de movimiento y 0,06 si se permite su rotura para reparar posteriormente), *h* es el calado y *K* es un efecto reductor por la pendiente del talud:

$$K = 1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \alpha}{\operatorname{sen}^2 \Phi}$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del talud y  $\Phi$  el de rozamiento interno del terreno donde se apoya la protección.

# 2.2.3. Científica.

Los problemas causados por erosión inducida por hélices en las infraestructuras portuarias pueden abordarse por vía experimental, mediante modelos a escala realizados en laboratorio. El problema de este enfoque es que requiere un alto coste en tiempo y dinero para el montaje experimental, por este motivo en muchos casos se busca generalizar los resultados para que sean aplicables al mayor número de situaciones posibles. Además de los estudios de Albertson sobre el flujo en jets ya comentados, se han realizado diferentes experimentos en los que se contribuye a una mejor caracterización del flujo en hélices y cómo afecta el mismo al fondo de las dársenas. De este tipo de publicaciones se obtuvo información para desarrollar métodos ingenieriles como los expuestos anteriormente (como es el caso de los coeficientes correctores).

Uno de los primeros ensayos que se realizaron para medir y valorar la exactitud de las fórmulas desarrolladas por Albertson fue **Blaaw y van de Kaa (1975)**. En esta publicación se presenta un estudio integral del problema, que incluye la caracterización del flujo de hélices y el análisis de estabilidad de las partículas del fondo.

Inicialmente se exponen los cálculos basados en el método de disco actuador para determinar la *efflux velocity*, también se resumen las principales características del estudio de Albertson sobre la difusión de los jets indicando que, si bien el flujo es distinto al de una hélice, puede ser válido a efectos de valorar únicamente el comportamiento de la componente axial de las velocidades. Para verificar esto, se realizó un montaje experimental con dos hélices, una abierta y otra entubada (*ducted propeller*), y se tomaron medidas de los perfiles de velocidad a diferentes distancias del plano de rotación. En el fondo del tanque se dispuso un lecho de partículas para realizar mediciones de su desplazamiento. Con las medidas de velocidad se obtuvo el parámetro de la ecuación de Albertson buscando el mejor ajuste , conocido este parámetro se pudo estimar la longitud de zona de establecimiento de flujo en 2,78 veces el diámetro de la hélice; este resultado difiere notablemente del de Albertson (que proponía una distancia de 6,2 veces el diámetro) y es similar a la obtenida por Hamil (2,77 veces el diámetro), esto puede deberse a que Albertson estudió el caso de los jet planos y, como ya se ha comentado, existen diferencias notables entre éstos y las estelas de hélices. Los resultados del experimento fueron los siguientes:







Ilustración 23: Comparativa de resultados experimentales y ecuación de Albertson. Imagen tomada de Blaaw y van de Kaa.

Se puede observar que las ecuaciones propuestas por Albertson se aproximan a los resultados experimentales a partir de una distancia de entre 5 y 7 veces el diámetro de la hélice, sin embargo, para distancias más próximas la formulación de Albertson infravalora las velocidades.



*Ilustración 24: Comparativa de resultados para cualquier posición en el eje axial. Imagen tomada de Blaaw y van de Kaa.* 

En el estudio se calculó también una curva genérica para la velocidad en la zona de flujo establecido, que permite calcular las curvas del resultado anterior a cualquier distancia de la hélice (siempre que esté en zona de flujo establecido). Se representan junto a ella las mediciones realizadas:

En este estudio se hizo también un análisis de la turbulencia del flujo, empleando para ello las fluctuaciones de la velocidad medida anteriormente. Debido a que el método de medida empleado consistió en un molinete, sólo se pudieron captar las fluctuaciones en la componente axial de la velocidad, que será

previsiblemente la más importante; por este motivo la medida de turbulencia de esta publicación debe interpretarse como un valor mínimo. La intensidad turbulenta (desviación estándar de las fluctuaciones de velocidad) se obtuvo a diferentes distancias del plano de rotación de la hélice, a continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron para la intensidad turbulenta relativa (ratio de intensidad turbulenta y velocidad) en el eje axial:







Ilustración 25: Valores de intensidad turbulenta relativa obtenidos en diferentes posiciones del eje axial. Imagen tomada de Blaaw y van de Kaa.

Se puede observar como la intensidad turbulenta relativa aumenta con la distancia al eje (puesto que la velocidad media disminuye) y se mantiene constante a partir de 6 a 8 veces el diámetro entorno a un valor de 0,25.

Una vez caracterizado el flujo en cuanto a velocidad media y turbulencia, se analizó la socavación generada sobre un lecho de partículas de granulometría y peso específico conocidos. La ecuación teórica para el inicio de movimiento de las partículas es:

$$\Psi = \frac{\tau}{\rho g \Delta D_{50}}$$

Donde  $\Psi$  es un parámetro que depende del tipo de partículas y su disposición en el fondo para números de Reynolds altos (como es el caso), la tensión tangencial  $\tau$  en el fondo se calcula con la expresión siguiente:

$$\tau = \rho V_{\bar{x}}^{2} = c_{f} \frac{1}{2} \rho V_{x}^{2}$$

Donde  $V_{\bar{x}}$  es la velocidad en el fondo que genera la tensión cortante, que se relaciona con la velocidad obtenida en el fondo con la ecuación de Albertson a través del coeficiente de fricción  $c_f$ . En este estudio se obtuvo un valor estimado del parámetro  $\Psi$  a partir del parámetro de transporte  $\Phi$ , que depende del caudal de sedimento que va a existir y de las propiedades del material del fondo; en la imagen siguiente se presenta la relación entre estos parámetros:



Ilustración 26: Relación entre el parámetro de estabilidad y el parámetro de transporte. Imagen tomada de Blaaw y van de Kaa.

Conociendo el valor del resto de elementos de las ecuaciones anteriores, se pudo calcular el valor del coeficiente de fricción  $c_f$  que oscila entre 0,06 y 0,11. Para obtener resultados más precisos se puede sumar a la velocidad media en el fondo  $V_x$  la componente turbulenta  $V_x'$ , de este modo se tendrá en cuenta que serán las velocidades máximas las responsables del movimiento de las partículas, aunque no se den con frecuencia. En este caso la fórmula queda del siguiente modo:





$$\tau = c_f' \frac{1}{2} \rho (V_x + 3V_x')^2$$

Donde  $V_x'$  es la intensidad turbulenta (desviación estándar de las fluctuaciones de velocidad), que se multiplica por 3 para obtener los valores máximos (por ejemplo, los excedidos sólo el 1% de las veces). En este caso cambia el valor del coeficiente de fricción del fondo, que oscila entre 0,02 y 0,03. Es importante tener en cuenta que estos valores del coeficiente de fricción sólo son aplicables en caso de emplear la expresión de Albertson para estimar la velocidad en el fondo.

En cuanto a la zona de máxima socavación se llegó a la conclusión de que queda comprendida entre las rectas z/x = 0.25 y z/x = 0.10.



Ilustración 27: Zona de máxima socavación definida por las rectas z/x=0,25 y z/x=0,10. Imagen tomada de Blaaw y van de Kaa.

Finalmente, en la publicación se expone un método de cálculo para socavación inducida por hélices en base a los resultados experimentales, se trata de un procedimiento similar a los tratados en el apartado de enfoque ingenieril:

- 1. Determinar  $V_0 \operatorname{con} V_0 = 1,60 n D \sqrt{K_T}$
- 2. Determinar el diámetro del orificio del jet equivalente con  $D_0 = 0.71 D_{prop.}$
- 3. Aplicar la ecuación de Albertson para obtener la velocidad en el fondo a la distancia de máxima socavación definida por las rectas z/x = 0.25 y z/x = 0.10:

$$\frac{V_x}{V_0} = 2,78 \frac{D_0}{x} e^{-15,43 \left(\frac{z}{x}\right)^2}$$

- 4. Determinar la tensión cortante en el fondo:  $\tau = c_f \frac{1}{2} \rho V_x^2$  con  $c_f = 0.06 \sim 0.11$ .
- 5. Se fija un caudal de sedimento admisible para el fondo, suficientemente bajo como para no causar problemas de erosión.
- 6. Se verifica la estabilidad del fondo. En primer lugar, se obtiene el parámetro de transporte  $\Phi = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g D_{50}^3}}$ , con  $\Phi$  se estima  $\Psi$  y, finalmente, se comprueba la condición

de estabilidad siguiente:  $\Delta D_{50} \ge \frac{\tau}{\rho q \Psi}$ .

**En Jian-Hao Hong et. al. (2013)** se realiza un estudio de la evolución temporal de la socavación, en este caso no se busca analizar el flujo generado por la hélice si no sus consecuencias en los movimientos de partículas del fondo.





En estudios anteriores como los de Hamil, se llegó a la conclusión de que el parámetro de mayor importancia en la profundidad de socavación era el número de Froude densimétrico:

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{g'd_{50}}}$$

Donde, de nuevo, aparece como parámetro fundamental la *efflux velocity*; también el diámetro medio de las partículas del fondo  $d_{50}$  y la aceleración de gravedad relativa  $g' = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}g$ .

El experimento consistía en hacer funcionar una hélice en el interior de un tanque, en el fondo del tanque se sitúa un lecho de sedimento de tamaño uniforme donde se midieron los perfiles resultantes del efecto de socavación. El montaje experimental se puede observar en el siguiente esquema:



Ilustración 28: Montaje experimental para el estudio de socavación. Imagen tomada de Jian-Hao Hong et. al.

En el experimento se observaron 3 zonas diferenciadas en el perfil de socavación, como puede verse en la imagen anterior. La Zona A se conoce como hoyo secundario y se genera debido a las componentes radial y tangencial del flujo generado por la hélice, la Zona B es el hoyo principal o primario y es el de mayor importancia, la Zona C es una acumulación del material desplazado del hoyo primario.

Se hicieron pruebas con dos hélices de diferente diámetro y dos tamaños de partícula distintos. Se observó que la socavación del lecho sigue una evolución en cuatro etapas:

- Etapa inicial. Se observa la aparición de un hoyo aguas debajo de la hélice (primario).
- Etapa de desarrollo. El tamaño del primario aumenta, aparece otro hoyo justo bajo la hélice (secundario) manteniéndose el fondo entre ellos intacto.
- Etapa de estabilización. El tamaño de ambos hoyos aumenta con el tiempo, el espacio entre ellos disminuye.
- Etapa asintótica. Los dos hoyos llegan a juntarse. A partir de este momento el tamaño de ambos es prácticamente constante, llegando a alcanzar el primario un tamaño del orden de 10 veces el diámetro de la hélice.

En la publicación se analiza la evolución del perfil de socavación a lo largo del tiempo, que depende de 4 variables fundamentales:

$$\frac{d_{s,t}}{D_p} = f\left(F_0, \frac{y_0}{D_p}, \frac{y_0}{d_{50}}, \frac{t}{D_p/U_0}\right)$$





Donde  $\frac{d_{s,t}}{D_p}$  es la profundidad de socavación en un instante "t" adimensionalizada con el diámetro de la hélice,  $F_0$  es el número de Froude densimétrico,  $Y_0$  es la distancia vertical entre el eje de la hélice y el fondo inicial (*offset*) y  $U_0$  es la *efflux velocity*. Con los resultados de los diferentes test se realizó una regresión no lineal para obtener la siguiente ecuación que define la profundidad de socavación en un instante dado:

$$\frac{d_{s,t}}{D_p} = k_1 \left[ log_{10} \left( \frac{U_0 t}{D_p} \right) - k_2 \right]^{k_3}$$

Donde se definen los coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  del siguiente modo:

$$k_{1} = 0.014F_{0}^{1.120} \left(\frac{y_{0}}{D_{p}}\right)^{-1.740} \left(\frac{y_{0}}{d_{50}}\right)^{-0.170}$$

$$k_{2} = 1.882F_{0}^{-0.009} \left(\frac{y_{0}}{D_{p}}\right)^{2.302} \left(\frac{y_{0}}{d_{50}}\right)^{-0.441}$$

$$k_{3} = 2.447F_{0}^{-0.073} \left(\frac{y_{0}}{D_{p}}\right)^{0.53} \left(\frac{y_{0}}{d_{50}}\right)^{-0.045}$$

Esta ecuación sólo es aplicable en el rango  $0.5 < \frac{y_0}{D_p} < 2,87$  y  $5.55 < F_0 < 11.1$ . Por sí misma no tiene una aplicación directa a los problemas ingenieriles, sin embargo de ella pueden extraerse otras fórmulas que proporcionan información muy valiosa en este sentido.

En primer lugar, fijando  $d_{s,t} = 0$  se obtienen las condiciones de inicio de socavación:

$$\log_{10}\left(\frac{U_0t}{D_p}\right) = k_2$$

Sustituyendo  $k_2$  por su valor en función de las variables fundamentales del problema y reordenando se obtiene la siguiente expresión para el inicio de socavación:

$$\frac{t_s}{\left(\frac{D_p}{U_0}\right)} = 10^{k_2} = 10^{\left[1,882F_0^{-0,009}\left(\frac{y_0}{D_p}\right)^{2,302}\left(\frac{y_0}{d_{50}}\right)^{-0,441}\right]}$$

Donde  $t_s$  es el tiempo que debe estar funcionando la hélice para que comience la socavación, como se puede deducir de la fórmula anterior, es directamente proporcional a  $y_0$  y  $d_{50}$  (cuanto más lejos está la hélice del fondo y cuanto mayor es el diámetro de las partículas que lo forman) e inversamente proporcional al número de Froude densimétrico y al diámetro de la hélice. Generalmente, el tiempo requerido para el comienzo de la socavación es bastante pequeño, para las condiciones del experimento osciló entre 0,06 y 12,1 segundos.

Se realiza además un análisis detallado de la fase asintótica puesto que, junto con la de iniciación, es la de mayor interés para caracterizar el problema. Se observa que la relación entre diámetro de la hélice y distancia de su eje al fondo (*offset ratio*)  $\frac{Y_0}{D_p}$  es otra variable con gran influencia en el proceso y no sólo el número de Froude densimétrico.

Esto se pone de manifiesto en el siguiente gráfico presentado en el artículo donde se representa la profundidad de socavación adimensional en fase asintótica  $\left(\frac{d_{s,me}}{d_0}\right)$  frente al offset ratio  $\left(\frac{y_0}{d_0}\right)$  para diferentes números de Froude densimétricos, para su elaboración se emplearon datos de





estudios en jets circulares, cuadrados y estelas de hélices, de forma que es válido para cualquiera de los tres casos,  $d_0$  es el diámetro del orificio de salida del jet circular, el lado del cuadrado o diámetro de la hélice.



Ilustración 29: Relación entre la profundidad máxima de socavación, offset ratio y número de Froude densimétrico. Imagen tomada de Jian-Hao Hong et. al.

Se puede observar cómo, para un número de Froude determinado, existe un *offset ratio* a partir del cual no existe socavación. Esto se debe a que los efectos de difusión de la estela hacen que la cantidad de movimiento se distribuya en mayor superficie, de modo que el chorro se hace menos intenso cuanto más se aleja del orificio de salida; cuanto mayor es el *offset* ratio mayor es la distancia a la que la estela entra en contacto con el fondo y, por tanto, la velocidad en el fondo también es menor. Por otra parte, para un *offset* determinado, existe un número de Froude a partir del cual se produce socavación, esto es más interesante desde el punto de vista del diseño ya que sobre este parámetro se puede actuar (a través de las características del material del fondo, recordar que depende de  $d_{50}$  y densidad del material). Con los datos disponibles se ajusta la siguiente expresión:

$$13\frac{d_{s,me}}{d_0} = 0,265 \left[F_0 - \left(4,114\frac{y_0}{d_0}\right)\right]^{0,955} \left(\frac{y_0}{d_0}\right)^{-0,022}$$

De esta ecuación se extrae el siguiente criterio de inicio de socavación:

$$F_{0,crit} = 4,114 \frac{y_0}{d_0}$$

Con este criterio se puede diseñar o verificar la protección contra socavación, pudiendo variar los parámetros que definen el número de Froude relacionados con el suelo (granulometría y peso específico), sobre el *offset* ratio es más complejo trabajar puesto que aumentarlo requeriría imponer restricciones a los barcos que pueden atracar en la infraestructura o aumentar el calado en la zona de amarre.

Se obtienen una serie de ecuaciones para determinar la variación temporal de la profundidad máxima de socavación, a partir de la cual pueden deducirse otras para determinar las condiciones de inicio de socavación.

En **Chao-Tsung Hsiao et. al. (2007)** se realizó un estudio del comportamiento de un jet en interacción con la superficie libre del agua, si bien el artículo va enfocado a analizar cuestiones





tales como las ondas generadas en superficie, ofrece información aplicable al problema de socavación como medidas de los perfiles de velocidad a diferentes distancias. Uno de los aspectos interesantes de este artículo es el empleo de modelos numéricos para caracterizar el flujo, que se comparan con las medidas experimentales para conocer su exactitud.

El experimento consistió en realizar mediciones en un tanque de agua de 22,86x1,52x1,52m en el que se introdujo una boquilla de 0,0813m de diámetro a una profundidad de dos veces su diámetro, que generó un jet con velocidad de salida de 4,2 m/s. Para las mediciones de velocidad se emplearon un tubo Pitot y un sistema PIV (*Particle Image Velocimetry*).

Además del caso experimental, se emplearon diferentes modelos numéricos para replicar el experimento y ver en qué medida son capaces de reproducir los resultados. Los modelos numéricos que se emplearon fueron los siguientes:

- DF\_UNCLE: Se trata de un modelo que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones. Utiliza el método *Artificial Compressibilty* para conseguir un sistema hiperbólico de ecuaciones y, para resolverlo, el método de volúmenes finitos.
- 3DYNAFS: Se basa en *Boundary Element Method*, las ecuaciones en las que se basa suponen un flujo no viscoso e incompresible. Puesto que en la zona de los límites del jet sí existen efectos viscosos, su modelización se lleva a cabo mediante la generación de vórtices en la boquilla del jet, que se propagan aguas abajo.
- LesInterFoam y RasInterFoam: se trata de métodos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de volúmenes finitos. Concretamente en el caso de interFoam se considera, mediante el método VOF (*Volume Of Fluid*) la existencia de aire y agua para modelizar la evolución de la superficie libre. La diferencia entre los dos métodos es que en el primer caso las estructuras turbulentas de pequeño tamaño (hasta un cierto límite) se modelizan, mientras que en el segundo se aproximan.

De los resultados numéricos y experimentales se obtuvieron las siguientes gráficas comparativas:



Ilustración 30: Comparativas entre resultados de medidas experimentales y de distintos modelos numéricos para el flujo en jets a lo largo del eje axial. Imagen tomada de Chao-Tsung Hsiao et. al.

En la gráfica se representa la medida de velocidad en el eje axial medida experimentalmente y la estimada por los diferentes modelos. Se observa que el que mejor se ajusta es lesInterFoam, uno de los métodos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que se emplearon para predecir el





comportamiento del jet, el otro método CFD empleado fue RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) que requiere menor potencia de cálculo, pero es menos preciso, no obstante, el método RANS también genera resultados bastante aproximados a la realidad como puede observarse en la gráfica derecha.

Como se comentó anteriormente, el flujo en jets es distinto a la estela generada por una hélice, sin embargo, los procesos de transferencia de energía entre la estela/jet y el fluido en reposo son similares si atendemos a la componente axial de la velocidad, por tanto, es interesante ver que los métodos CFD son capaces de reproducir con bastante exactitud estos fenómenos.

# 2.2.4. Métodos numéricos CFD.

La dinámica computacional de fluidos (CFD) es una técnica de resolución de las ecuaciones de gobierno del fluido (ecuaciones de Navier Stokes) que permiten predecir el comportamiento del fluido en determinadas condiciones. Su uso en el análisis de hélices está extendido, puede emplearse para optimizar su diseño hidráulico, reducir las vibraciones que genera o en otros tipos de estudio; se pueden encontrar publicaciones con este tipo de análisis como N. Abbas et al. (2015) donde se calculan las vibraciones producidas por el funcionamiento de la hélice, empleando este tipo de modelos para modelizar con gran detalle el flujo en el entorno cercano a la hélice.



Ilustración 31: Estructuras turbulentas generadas por el funcionamiento de la hélice modelizadas con CFD. Imagen tomada de N. Abbas et al.

Como se ha visto en Chao-Tsung Hsiao et. al. (2007), estos métodos también son capaces de reproducir el comportamiento de un jet con bastante precisión. Sin embargo, por el momento no se han aplicado al problema de socavación inducida por hélices.

# 2.2.4.1. Enfoques lagrangiano y euleriano. Ecuaciones de gobierno.

Los programas de CFD pueden resolver las ecuaciones de gobierno planteadas con un enfoque euleriano o lagrangiano, siendo el primero el más común. El enfoque euleriano en el análisis del comportamiento de los fluidos se fija en las propiedades del fluido en un determinado lugar (elemento) fijo en el espacio, mientras que el lagrangiano se fija en las propiedades de las partículas del fluido.

Las propiedades a determinar en cada elemento (siguiendo el enfoque euleriano) para un caso general son velocidad en 3 direcciones, presión, temperatura, energía interna y densidad; por tanto, hay 7 incógnitas en cada elemento. En algunos casos es más sencillo plantear las ecuaciones en un enfoque lagrangiano y luego convertirlas al euleriano, para esto se emplea la siguiente relación siendo  $\phi$  una propiedad cualquiera del fluido (energía, cantidad de movimiento, etc.):





$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + div(\rho\phi u) = \rho \frac{D\phi}{Dt}$$

Donde los términos a la izquierda de la igualdad están referidos a un elemento y son el incremento de la propiedad  $\phi$  en el tiempo y el flujo de  $\phi$  del elemento. El término a la derecha es el incremento de  $\phi$  de una partícula, suma del cambio en función del tiempo y del lugar en que se encuentra.

Las ecuaciones de gobierno son las de conservación de la masa, conservación de energía y conservación de cantidad de movimiento y ecuaciones de estado. Para su obtención se plantean las ecuaciones en una partícula de fluido (enfoque lagrangiano) y, posteriormente, se aplica la relación anterior para pasarlas a euleriano. El resultado final se expone a continuación.

#### Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho u) = 0$$

Conservación de la energía (i):

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + div(\rho iu) = -p \, div(u) + div(k \, gad(T)) + \Phi + S_i$$

Conservación de cantidad de movimiento (Navier-Stokes):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + div(\rho uu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + div(\mu \operatorname{grad}(u)) + S_{Mx}$$
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + div(\rho vu) = -\frac{\partial p}{\partial y} + div(\mu \operatorname{grad}(v)) + S_{My}$$
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + div(\rho wu) = -\frac{\partial p}{\partial z} + div(\mu \operatorname{grad}(w)) + S_{Mz}$$

**Ecuaciones de estado:** relacionan energía interna, temperatura, densidad y presión para poder cerrar el sistema de ecuaciones. Para un gas ideal estas ecuaciones son:

$$p = \rho RT$$
$$i = C_{v}T$$

Se tienen finalmente 7 ecuaciones y 7 incógnitas para cada elemento.

Cabe destacar que existe una similitud entre las ecuaciones de cantidad de movimiento y de energía. Se debe a que, en definitiva, se trata de ecuaciones de transporte de una determinada propiedad. Puede escribirse la ecuación general de transporte de una propiedad cualquiera ( $\phi$ ) del siguiente modo:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + div(\rho\phi u) = div(\Gamma grad(\phi)) + S_{\phi}$$

Donde se pueden distinguir los términos siguientes:

- $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$  es la variación en el tiempo de la propiedad  $\phi$ .
- $div(\rho\phi u)$  es el transporte convectivo de  $\phi$ .
- $div(\Gamma grad(\phi))$  es el transporte difusivo de  $\phi$ .




•  $S_{\phi}$  es un término fuente de  $\phi$  (como una reacción química o una fuente de calor).

Sin embargo, las ecuaciones anteriormente descritas están planteadas en forma diferencial. Para aplicar los métodos numéricos de resolución (método de los volúmenes finitos generalmente) se deben plantear en forma integral aplicando el teorema de la divergencia de Gauss:

$$\int div(a)dV = \int n \cdot a \, dA$$

La ecuación general de transporte de una propiedad cualquiera puede escribirse entonces del siguiente modo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int \rho \phi dV \right) + \int n \cdot (\rho \phi u) \, dA = \int n \cdot (\Gamma \, grad(\phi)) dA + \int S_{\phi} dV$$

## 2.2.4.2. Método de resolución.

Las ecuaciones anteriormente comentadas deben resolverse para obtener las propiedades del fluido con cada punto. El método más común para lograrlo es el de volúmenes finitos, en algunos casos se utilizan otros como el de elementos finitos o el de diferencias finitas.

En el método de volúmenes finitos, para un determinado dominio, se debe hacer una división en celdas y nodos. Cada una de estas celdas se corresponde con un elemento sobre el que se aplican las ecuaciones de gobierno (en forma integral) y se determinan las propiedades del fluido mediante un algoritmo iterativo. Los cálculos se realizarán en los nodos, que se encuentran en el interior del elemento.

Para calcular las integrales se necesita conocer el valor de las diferentes propiedades en las caras de cada elemento, mientras que los cálculos se realizan en los nodos. Por este motivo, se debe realizar una interpolación entre los nodos de una celda y la adyacente para determinar el valor de las variables en la cara entre ellas. Existen diferentes métodos de interpolación.

## 2.2.5. Resumen de publicaciones.

A continuación, se incluye una tabla resumen con las publicaciones comentadas en el enfoque científico y métodos numéricos CFD, y las aportaciones fundamentales que realiza cada una en lo referente a este trabajo.



TÍTULO	AUTOR	APORTACIONES
Diffusion of submerged jets.	Albertson et al. (1950)	<ul> <li>Caracterización del flujo en jets mediante ecuaciones analíticas.</li> <li>Conceptos extrapolables al flujo en hélices (zonas del flujo, procesos de difusión).</li> </ul>
A review of the equations used to predict the velocity distribution within a ship's propeller jet.	W. Lam et al. (2011)	Resumen general de los conocimientos disponibles y ecuaciones.
Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of maneuvering ships.	Blaaw y van de Kaa (1975)	<ul> <li>Adaptación de las ecuaciones de Albertson a flujo en hélices (coeficientes).</li> <li>Conjunto de datos experimentales de velocidad generada por las hélices.</li> <li>Estimación de la intensidad turbulenta del flujo generado por hélices.</li> <li>Estudio de la erosión producida en el fondo y caracterización de los coeficientes de fricción.</li> <li>Propuesta de método de cálculo.</li> </ul>
Scour Caused by a Propeller Jet.	Jian-Hao Hong et al. (2013)	<ul> <li>Análisis en detalle de la erosión en el fondo.</li> <li>Ecuaciones para determinar la geometría resultante, profundidad máxima y condiciones de inicio de socavación.</li> <li>Parámetros más influyentes: número de Froude y offset ratio.</li> </ul>
Numerical and Experimental Study of a Horizontal Jet Below a Free Surface.	Chao-Tsung Hsiao et al. (2007)	<ul> <li>Comparativa entre resultados experimentales y diversos modelos numéricos en jets.</li> </ul>
CFD prediction of unsteady forces on marine propellers caused by the wake nonuniformity and nonstationarity.	N. Abbas et al. (2015)	<ul> <li>Cálculo, mediante modelos numéricos CFD, del flujo generado por una hélice en campo cercano. Ejemplo de aplicación del CFD en hélices, en este caso enfocado al cálculo de vibraciones.</li> </ul>





## 2.3. SUMARIO Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DISPONIBLES.

En lo referente a la socavación inducida por hélices, se observa que las aproximaciones ingenieriles buscan un amplio rango de aplicación, pero se basan en hipótesis y razonamientos que implican importantes simplificaciones derivadas de la aplicación de *Axial Momentum Theory* y ecuaciones de Albertson para jets. Por otra parte, las aproximaciones científicas al problema han intentado solucionar los problemas de exactitud anteriores mediante coeficientes correctores (Blaaw y Van de Kaa (1975)); también han tratado el problema de forma integral (como en Jian-Hao Hong et. al. (2013)) consiguiendo gran precisión, pero con un rango de aplicación menor y con mayores costes en cuanto a tiempo y dinero en comparación con los métodos ingenieriles. Por último, en Chao-Tsung Hsiao et. al. (2007) y N. Abbas et al. (2015) se observa que los modelos numéricos son capaces de reproducir adecuadamente los fenómenos de difusión de jets y el flujo generado por la hélice en su entorno cercano.

Teniendo en cuenta lo anterior, el técnico puede recurrir a metodologías más prácticas como las expuestas en ROM e Informe PIANC 180-2015 o realizar pruebas experimentales reproduciendo la situación a escala. En el primer caso la precisión de los resultados es menor, por lo que deberá compensarse el desconocimiento sobredimensionando de la obra. En el segundo caso la precisión será superior, pero con un coste en tiempo y dinero mayor en los estudios (correspondiente al montaje del experimento, realización de los ensayos, etc.).

## 2.4. OBJETIVOS.

Los objetivos que se plantean para este estudio son los siguientes:

- Desarrollo de un modelo de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) que permita analizar en profundidad el problema de la socavación inducida por el funcionamiento de las hélices.
- Obtención de un modelo validado para reproducir el flujo en la estela de una hélice y determinación de los parámetros más influyentes.
- Propuesta de adaptación de los métodos analíticos existentes en base a los resultados que se obtengan del modelo mediante la obtención de coeficientes, de forma que el modelo CFD pueda incluirse como parte de dichos métodos.
- Empleo del modelo anterior en el desarrollo de una metodología propia para la obtención de tensiones tangenciales generadas en el fondo, pudiendo determinar además las zonas con posibilidad de sufrir erosión y diseñar la protección necesaria. Determinar los parámetros más influyentes en este análisis.

## 2.5. APORTACIÓN DEL TRABAJO.

En el presente trabajo se pretende alcanzar una solución de compromiso entre el enfoque ingenieril y el experimental, mejorando la precisión del primero y los costes del segundo en tiempo y dinero. Para conseguirlo se recurre a modelos numéricos de CFD, ya que se comprobó que son capaces de reproducir el comportamiento de jets y la estela generada por una hélice está condicionada por procesos hidrodinámicos similares. Un modelo numérico validado con datos experimentales es aplicable en un amplio rango de casos y proporciona suficiente exactitud. Además, los tiempos de cálculo requeridos y el coste monetario son inferiores a los de la realización de experimentos a escala.

La principal dificultad en el uso de modelos numéricos es la complejidad para elaborarlos y validarlos, en este trabajo se desarrolla un modelo y se valida de forma que sea directamente





aplicable para el análisis. También se busca simplificar la información requerida sobre el sistema de propulsión con la menor pérdida de precisión posible para facilitar su uso.





## 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CAMPO CERCANO.

## 3.1. ANÁLISIS DEL CAMPO CERCANO.

Se plantea la simulación de una hélice mediante una condición de contorno en la que se definirán las velocidades de entrada. Para mayor comodidad se empleará un sistema de coordenadas cilíndrico para describir la velocidad del fluido en dicha condición de contorno, de modo que será necesario definir la velocidad generada por la hélice mediante las tres componentes siguientes:

- **Axial:** se empleará para su cálculo la ecuación de Albertson, que se presentará en función de la potencia y diámetro de la hélice y no en función del coeficiente de empuje.
- **Tangencial:** se estima, de acuerdo con lo expuesto en W. Lam et al. (2011), en un 30% de la velocidad axial como máximo. El máximo de velocidad tangencial estará en el extremo de la hélice mientras que en el centro la velocidad tangencial será nula.
- **Radial:** Se estima como el 10% de la axial, de acuerdo con lo expuesto en W. Lam et al. (2011).

El software de CFD que se va a emplear para resolver el caso permite acceder al vector posición de cada una de las celdas que conforman la malla. Conocida la posición del eje de la hélice (vector  $\vec{C}$ ) en el sistema global de coordenadas cartesianas, basta con restar este vector al de posición de cada punto (vector  $\vec{P}$ ), también en coordenadas globales, para obtener el vector radio (vector  $\vec{r}$ ) necesario para definir las componentes de la velocidad anteriores en cada punto de la condición de contorno.

$$\vec{r} = \vec{P} - \vec{C}$$



Ilustración 32: Determinación del vector radio en un punto genérico de la condición de contorno y esquema con las componentes de la velocidad en coordenadas cilíndricas.

La forma de obtener cada uno de los vectores de componentes de la velocidad (axial, tangencial y radial) en un punto genérico, determinado el vector  $\vec{r}$  como se acaba de explicar, se detalla en el apartado de condiciones de contorno.

## 3.2. GEOMETRÍA.

Para el análisis del flujo en campo cercano de la hélice se construye un dominio consistente en un cubo de 7 veces el diámetro de la hélice (51.1 metros) de lado. La hélice se va a situar la hélice es un círculo de 7,3 metros de diámetro centrado en una de las caras del cubo.





En cuanto a los ejes de referencia, se empleará en el modelo un sistema cartesiano global donde el origen de coordenadas se sitúa como se indica en la siguiente ilustración.



Ilustración 33: Geometría del dominio y sistema global de coordenadas cartesianas.

El sistema de coordenadas cilíndricas se empleará, como ya se ha indicado, para aplicar las condiciones de contorno de velocidad. Se trata de un sistema local centrado en el buje de la hélice de modo que el eje axial coincide con el de la hélice.



Ilustración 34: Sistema local de coordenadas cilíndricas centrado en el buje de la hélice.

## 3.3. MALLA.

Para la primera simulación se divide cada uno de los lados en 100 partes iguales, formando un total  $10^6$  celdas. Sin embargo, para asegurar que el tamaño de dichas celdas no influye en el resultado del modelo, se realizará un análisis de sensibilidad aumentando el número de divisiones en cada lado hasta verificar que el resultado permanece constante. En la siguiente ilustración se muestra una vista tridimensional de algunas partes de la malla junto con el sistema de ejes coordenados que se empleará como referencia.







Ilustración 35: Partes de la malla y sistema de referencia.

## 3.4. CONDICIONES DE CONTORNO.

Sobre el dominio hay que aplicar una serie de condiciones de contorno para la velocidad, presión y parámetros de turbulencia. A continuación, se describen los cálculos y razonamientos que se realizan para determinar estas condiciones de contorno.

## 3.4.1. Velocidad axial.

Como se ha explicado se empleará para su cálculo la fórmula de Albertson et. al (1950), las otras componentes de la velocidad generada por la hélice dependerán a su vez de la axial.

Para obtener datos que permitan aplicar la ecuación anterior se debe definir el tipo de barco. Puesto que los cruceros son la tipología que más problemas genera desde el punto de vista de la socavación se va a calcular para un buque de este tipo. Se recurre al Informe PIANC 180-2015 para obtener datos de potencia y diámetro típicos, en él se indica que la potencia de la hélice principal oscila entre 70.000 kW y 120.000 kW, para este cálculo se toma el valor superior del intervalo. Se considera además que el crucero cuenta con una única hélice, en caso de haber más se dividirá la potencia total entre el número de hélices y se realizarán los cálculos posteriores con la potencia de cada una.

El diámetro para una hélice de esta potencia se calcula con la ecuación propuesta por van Manen (1958) recogida en el Informe PIANC 180-2015 y simplificada del siguiente modo:

$$D_p = \alpha P^{0,2}$$

Donde  $\alpha$  es un coeficiente de valor 0,7 para el sistema de propulsión principal.

Se obtiene que el diámetro de hélice correspondiente a la potencia de 120.000 kW es de 7,3 metros.

Con estos datos se puede acudir a la ecuación siguiente, derivada de la de Albertson, para obtener la velocidad de salida de la hélice.

$$V_0 = C_3 \left( \frac{f_p P_D}{\rho_w D_p^2} \right)^{0.33}$$





Donde  $P_D$  es la potencia máxima de la hélice,  $D_p$  es el diámetro de la hélcie,  $f_p$  es un factor que representa la cantidad de potencia que se emplea en la maniobra de atraque respecto a la máxima, como se indica en el Informe PIANC 180-2015 tiene un valor máximo estimado del 15%.  $C_3$  es un coeficiente que para hélices en entorno abierto tiene un valor de 1,48. Aplicando esta ecuación se obtiene  $V_0 = 1,03 m/s$ . En caso de existir dos hélices la velocidad de salida en cada una de ellas es superior a este valor, repitiendo los cálculos anteriores se obtiene en este cas  $V_0 = 1,14 m/s$  en cada una de las hélices.

Una vez calculada la magnitud de velocidad axial, hay que tener en cuenta que el campo de velocidades es un campo vectorial, es decir, la velocidad debe definirse como un vector. Conocida la magnitud de velocidad axial basta con multiplicarla por el vector unitario en dirección axial para obtener el vector de velocidad axial. Con la configuración que se va a adoptar para el modelo numérico la dirección axial se corresponde con la dirección X en coordenadas cartesianas, por tanto, la velocidad axial se puede determinar del siguiente modo:

$$\overrightarrow{V_a} = 1,03 \ \vec{\iota}$$

Donde  $\overrightarrow{V_a}$  es el vector de velocidad axial e  $\vec{\iota}$  es el vector unitario en la dirección X.

## 3.4.2. Velocidad radial.

Como se indica en Lam et al. (2011) esta componente supone un 10% del valor de la axial, por tanto, su magnitud es  $V_r = 0.1 m/s$ , se considera que es constante en a lo largo del radio.

La dirección de esta componente es la misma del radio, por tanto, se puede obtener el vector de velocidad radial en un determinado punto multiplicando la magnitud anteriormente calculada por el vector unitario con la dirección del radio de dicho punto. El software que se va a emplear para el modelo numérico permite acceder al vector radio de cada punto de la condición de contorno, por tanto, el vector velocidad radial se puede fijar como:

$$\overrightarrow{V_r} = 0,1 \ \frac{\overrightarrow{r}}{|\overrightarrow{r}|}$$

Donde  $\overrightarrow{V_r}$  es el vector de velocidad radial,  $\overrightarrow{r}$  es el vector que une el centro de rotación (posición del eje de la hélice) con el punto donde se quiere determinar  $\overrightarrow{V_r}$  y  $|\overrightarrow{r}|$  es el módulo del vector  $\overrightarrow{r}$ .

## 3.4.3. Velocidad tangencial.

En Lam et al. (2011) se indica que su valor es del orden del 30% del de la velocidad axial, este dato resulta ambiguo ya que la velocidad tangencial no tiene un valor fijo si no que se distribuye de una determinada forma a lo largo de la dirección radial. Para el propósito de este estudio se considera suficiente con considerar una variación lineal de la velocidad tangencial a lo largo del radio (como si se tratase de un sólido rígido), fijando el valor máximo de esta componente en un 30% de la velocidad axial que se dará en una distancia al eje de rotación igual al radio de la hélice. Por tanto, la velocidad tangencial tendrá la magnitud siguiente en el extremo del radio  $V_{t.máx} = 0.31 m/s$ .

A partir de este dato se obtiene la velocidad de rotación del supuesto sólido rígido, cabe destacar que esta velocidad de rotación no es igual a la de la hélice.

$$\omega = \frac{V_{t,máx}}{R} = \frac{0.31}{3.65} = 0.085 \, s^{-1} = 0.81 \, rpm$$

Donde *R* es el radio de la hélice.





Además, la dirección de la velocidad tangencial es siempre perpendicular al radio y contenida en el plano de rotación (por tanto, también es perpendicular al eje axial). Para introducir esto en el programa de cálculo se necesita conocer en cada punto el vector unitario en dirección tangencial. Para obtener la dirección del vector se hace el producto vectorial del vector radio por el axial, siendo el vector unitario igual al resultado de este producto dividido entre su módulo. Luego el vector de velocidad tangencial se puede obtener del siguiente modo:

$$\vec{V_r} = V_t \; \frac{\vec{r} \times \vec{\iota}}{|\vec{r} \times \vec{\iota}|}$$

Donde  $\vec{V_r}$  es el vector de velocidad tangencial en un punto cualquiera,  $\vec{r}$  es el vector que une dicho punto con el eje de rotación,  $\vec{i}$  es el vector unitario en dirección axial,  $\vec{r} \times \vec{i}$  denota el producto vectorial de los dos vectores anteriores,  $|\vec{r} \times \vec{i}|$  su módulo y  $V_t$  la magnitud de la velocidad tangencial que puede calcularse como  $V_t = \omega |\vec{r}|$ . Esta ecuación puede reescribirse en función de la velocidad de rotación, dejando el vector de velocidad tangencial únicamente en función de dicha velocidad de rotación (constante), el radio del punto y el vector unitario en dirección X:

$$\vec{V_r} = \omega |\vec{r}| \frac{\vec{r} \times \vec{\iota}}{|\vec{r} \times \vec{\iota}|}$$

Para obtener la velocidad en metros por segundo se debe introducir la velocidad angular en radianes por segundo.

## 3.4.4. Condiciones de contorno para la velocidad.

En el dominio existirán tres tipos de condiciones de contorno diferentes en el modelo; siguiendo la nomenclatura del software que se va a emplear para los cálculos (OpenFOAM) se distinguen las siguientes:

- *fixedValue*: el valor del vector velocidad estará definido por el usuario. Se aplicará en las celdas de la condición de contorno de la hélice para definir las componentes anteriormente calculadas (axial, radial y tangencial).
- noSlip: el vector velocidad será igual a 0 en el contorno. Esta condición se emplea en contornos de tipo pared sólida en la que no exista deslizamiento relativo entre el fluido y el sólido. En el montaje experimental con el que se valida, así como en otros experimentos con los que se analizan chorros sumergidos, alrededor de la hélice o salida del chorro hay una pared. Por tanto, en el modelo se dispone una condición de este tipo en el lateral de la hélice, alrededor de la misma.
- *zeroGradient*: Establecer un gradiente nulo implica que no habrá variación de la velocidad en una determinada dirección (en este caso se aplica a todas las direcciones), expresada en forma matemática se tiene:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial z} = 0$$

Es importante tener en cuenta que esto sólo se cumple en regiones suficientemente alejadas de la zona afectada por la hélice, puesto que, en las zonas cercanas a ella, debido a los efectos de viscosidad y turbulencia, sí existirá un gradiente de velocidad, disminuyendo su valor en puntos más alejados de la hélice.







Ilustración 36: Condiciones de contorno aplicadas en el modelo numérico.

#### 3.4.5. Condiciones de contorno para el modelo de turbulencia.

En la difusión de la estela de la hélice los fenómenos turbulentos juegan un papel fundamental por lo que debe escogerse un modelo de turbulencia adecuado. El modelo que se va a emplear para simular la turbulencia del flujo pertenece al grupo de los métodos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), concretamente se utilizará el modelo K-Omega SST cuyos parámetros fundamentales son los coeficientes k y omega.

El modelo K-Omega SST consiste en una combinación de otros dos modelos, el k-Épsilon y el k-Omega, empleando uno u otro según el tipo del flujo. El modelo k-Épsilon funciona bien en regiones donde no haya problemas de desprendimiento de la capa límite, su principal ventaja es la menor sensibilidad frente a variaciones en sus parámetros. Por otra parte, el modelo k-Omega funciona mejor en zonas cercanas a contornos sólidos ya que modeliza mejora la capa límite, presentando ciertos problemas de estabilidad en las de flujo abierto al ser más sensible a variaciones en sus parámetros. El modelo k-Omega SST utiliza una función de mezcla (*blending function*) dependiente de la longitud de escala turbulenta, distancia al contorno sólido y número de Reynolds turbulento para determinar qué modelo tiene más influencia en cada punto; esta función de mezcla tiene valor 0 en el contorno sólido, tiende a la unidad al alejarse del mismo y debe suponer una transición suave para evitar problemas numéricos.

En el caso que se quiere resolver consiste inicialmente en una zona de flujo sin influencia de capas límite (la parte en la que se desarrolla la estela de la hélice), pero al introducir el fondo del muelle habrá una zona de capa límite que deberá modelizarse adecuadamente para obtener un valor realista de las tensiones tangenciales, el modelo k-Omega funcionará mejor en esta segunda zona. Por tanto, el modelo k-Omega SST resulta una buena opción.

Otra posibilidad sería emplear un modelo más preciso, como es el caso de los modelos LES (*Large Eddy Simulation*) o los modelos DNS (*Direct Numerical Simulation*), sin embargo, éstos requieren un mallado más fino y un tiempo de cálculo muy superior no siendo prácticos para la aplicación que se quiere dar al modelo.





Por tanto, se concluye que el modelo más apropiado es el k-Omega SST, el cual presenta un buen comportamiento tanto en la zona de flujo abierto (donde funcionará como un modelo k-Épsilon) como en la de capa límite (donde los hará como un k-Omega).

En general, la obtención de los parámetros del modelo de turbulencia es compleja y en el caso concreto del flujo libre (no confinado en tuberías) no se cuenta con datos indicativos. En los estudios de Blaaw y van de Kaa (1975) se indican valores de la intensidad turbulenta (relación entre el valor de la componente media de la velocidad y el de las fluctuaciones), que en las proximidades de la hélice tiene un valor aproximado de 0,15 aumentando con la distancia al plano de rotación hasta estabilizarse en un valor en torno a 0,3. Por este motivo se tomará en la condición de contorno una intensidad turbulenta del 15%.

Conocida la intensidad turbulenta se puede determinar el valor de k, que representa la energía cinética de la turbulencia:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2$$

Donde *U* es la velocidad media e *I* es la intensidad turbulenta. El estudio de Blaaw y van de Kaa presenta mediciones de la intensidad turbulenta en dirección axial, por tanto, se empleará también la componente axial de la velocidad en el cálculo de *k*, se obtiene  $k = 0.036 (m/s)^2$ .

Se debe obtener también el parámetro omega, que es el ratio de disipación específico de la energía turbulenta (representa la pérdida de energía cinética turbulenta al transformarse en energía térmica). Para su cálculo en el modelo K-omega SST incluido en OpenFOAM v1612+ se emplea la siguiente fórmula:

$$\omega = C_{\mu}^{-1/4} \frac{\sqrt{k}}{l} \approx (0.09 \ k)^{-1/4} \frac{\sqrt{k}}{l}$$

Como se puede observar, en esta ecuación interviene el parámetro *l*, que es la longitud de escala turbulenta y representa el tamaño máximo de los remolinos que pueden aparecer en el flujo. Para el caso de una hélice, las estructuras turbulentas que suelen generarse pueden clasificarse en dos grupos:

- Vórtices en el extremo de los álabes, generados por el desprendimiento de la capa límite, son similares a los generados en el extremo de las alas de un avión.
- **Vórtice central,** se genera por la rotación del buje, es el de mayor tamaño y tiene una dimensión aproximadamente igual al diámetro del buje.







Ilustración 37: Formación de vórtices en una hélice de barco, las burbujas producidas por la cavitación visualizar los vórtices desprendidos en el extremo de cada álabe, así como el generado en el buje de la hélice. Imagen tomada de www.nakashima.co

De este modo, se tomará como longitud de escala turbulenta el diámetro del buje de la hélice, que se puede suponer como el 20% del diámetro de la hélice. Por tanto, se toma un valor para la longitud de escala turbulenta de 1,46 metros.

Aplicando la ecuación anteriormente comentada se obtiene  $\omega = 0.544 \ s^{-1}$ .

## 3.4.6. Condiciones de contorno para presión.

En la mayoría de situaciones en que se analizan hélices con fórmulas analíticas se supone una distribución hidrostática de presiones. En este caso si existiesen variaciones el modelo será capaz de reproducirlas.

Las condiciones en los laterales del dominio serán de tipo *zeroGradient*, es decir, no va a haber variación (misma condición que se establece en algunos contornos para la velocidad). Sin embargo, el modelo debe tener algún punto de referencia para poder establecer valores; con esta finalidad se establece que la presión relativa en la parte superior el dominio será igual a 0. Hay que tener en cuenta que en el experimento con el que se va a validar el modelo este punto se corresponde con la superficie libre del tanque, por tanto, establecer en este contorno una presión relativa de 0 es adecuado (coincide con la atmosférica).

## 3.4.7. Resumen de parámetros para la simulación.

En la siguiente tabla se resumen los parámetros fundamentales que se emplean en la simulación del campo cercano de la hélice.

Parámetro	Valor	
Diámetro de hélice	7,3 m	
Velocidad axial	1,03 <i>m/s</i>	
Velocidad tangencial	0,31 <i>m/s</i>	
Velocidad radial	0,1 <i>m/s</i>	
Intensidad turbulenta	15 %	
Longitud de escala turbulenta	1,46 m	
k	$0,036 \ (m/s)^2$	
omega	$0,544  s^{-1}$	
Posición del eje	[0; 25,55; 25,55]	
Dimensiones del dominio	51,1 x 51,1 x 51,1 <i>m</i>	





# 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLSIS DE CAMPO CERCANO.

Una vez se han realizado los cálculos hay que extraer la información del modelo que interesa a efectos de validación. Para esto hay que fijarse en los resultados del caso experimental de Blaaw y Van de Kaa (1975), anteriormente comentados, e intentar replicarlos. Concretamente, el resultado de mayor interés es el gráfico de perfiles de velocidad a distintas distancias de la hélice. Los datos del modelo se obtienen escaneando las gráficas con un programa que permite obtener las coordenadas de los puntos partiendo del gráfico.

En cuanto a los resultados del modelo numérico, deberán obtenerse en las mismas posiciones y representarse del mismo modo que los del experimental. Para esto se establece el mismo plano de mediciones que en el experimento, este plano es vertical y contiene al eje X del dominio (eje axial). En este plano se definirán una serie de líneas a distintas distancias del eje, que serán múltiplos del diámetro de la hélice (al igual que en el caso experimental). Mediante un programa se leen los datos de la componente X de la velocidad (velocidad axial) de la solución del modelo en dichas líneas. Los datos de la velocidad en estas líneas se representan posteriormente junto con los datos experimentales para hacer la comparación entre modelo numérico y experimental.



Ilustración 38: Plano y líneas donde se realizarán las medidas del campo de velocidades obtenido como solución del modelo numérico.

## 4.1. CONTORNOS DE VELOCIDAD Y LÍNEAS DE CORRIENTE.

Es importante asegurarse de que el modelo proporciona resultados razonables de acuerdo con el conocimiento que se tiene sobre las estelas de hélices antes de empezar a obtener resultados numéricos concretos para validarlo. A este efecto se han obtenido las siguientes imágenes, donde se observa un comportamiento adecuado del modelo. Para facilitar la comprensión se incluyen en todas las ilustraciones la posición de los ejes coordenados (X, Y, Z) en la esquina inferior izquierda.

## 4.1.1. Contornos de velocidad en el plano longitudinal.

En primer lugar, se presentan los contornos de velocidad del dominio, se han obtenido en el plano de medida que contiene al eje X y es perpendicular al eje Z. La velocidad representada se corresponde con la magnitud de la velocidad (no sólo la componente en X). Se incluye a modo indicativo un dibujo de la posición de la hélice que generaría el flujo a modo indicativo, sin que la misma forme parte del modelo numérico como ya se ha indicado.







Ilustración 39: Contornos de velocidad en el plano perpendicular a Z que contiene al eje X (sección longitudinal del dominio).

La estela de la hélice tiene a aumentar de tamaño en posiciones alejadas del plano de rotación como era de esperar puesto que se produce una transferencia de cantidad de movimiento de las partículas del interior de la estela (con alta velocidad) hacia las del exterior (con velocidad nula). Se observa como la magnitud de la velocidad es máxima en la condición de contorno donde se definieron las componentes de velocidad generadas por la hélice.

## 4.1.2. Contornos de velocidad en secciones transversales.

El siguiente punto es la obtención de estos mismos contornos de velocidad en varias secciones transversales al dominio (perpendiculares al eje X).



Ilustración 40: Contornos de velocidad en el plano perpendicular a X a una distancia de 2 veces el diámetro de la hélice del plano de rotación (sección transversal del dominio)

Observando estos contornos junto con los anteriores se confirma que el dominio de velocidades tiene simetría axial entorno al eje X como ya se había comentado anteriormente y, por tanto, los gráficos proporcionados en Blaaw y Van de Kaa (1975) son suficientes para caracterizar el campo de velocidades generado por la hélice. Esto cambiará en el momento en que se introduzca el fondo marino en el dominio.





## 4.1.3. Líneas de corriente.

Para finalizar las comprobaciones de funcionamiento del modelo se presentan las líneas de corriente generadas por la hélice, donde se ha incluido un dibujo esquemático de la situación de la hélice para facilitar su interpretación.





Se puede observar cómo las partículas del fluido describen efectivamente un movimiento helicoidal alrededor del eje X. Conviene recordar que ésta es la principal característica que diferencia el flujo de un chorro plano (estudiados por Albertson en 1950) y la estela de una hélice.

## 4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO Y GRÁFICOS COMPARATIVOS.

A continuación, se muestra el gráfico comparativo donde se han representado los resultados de perfiles de velocidad en distintas posiciones en experimento de Blaaw y Van de Kaa (1975) junto con los del modelo numérico que se ha descrito. Los datos del experimento se corresponden con los círculos negros mientras que los del modelo se han representado con línea azul continua.

Del mismo modo que en el artículo de Blaaw y Van de Kaa (1975) anteriormente comentado, los resultados se dan adimensionalizados. El eje X del gráfico corresponde a la posición del perfil de velocidad dividida entre el diámetro de la hélice, es decir, en la posición del eje  $\frac{x}{D_0} = 4$  la se

representa el perfil de velocidades a una distancia de 4 veces el diámetro de la hélice (29,2 m). Sobre el eje horizontal también se representan las velocidades adimensionalizadas con la velocidad axial de salida de la hélice (que es de 1,03 m/s). En el eje de abscisas, se representa la distancia al eje de rotación de la hélice, también está adimensionalizada con el diámetro de la hélice, de modo que la posición Y=0 se corresponde con el eje de rotación de la hélice y la posición Y=3 con una distancia al eje de 3 veces el diámetro (21,9 m). Es importante recordar que éste es un caso con simetría axial (alrededor del eje de rotación de la hélice) y, por tanto, estos perfiles son representativos de todo el dominio.







Ilustración 42: Gráfico comparativo entre resultados experimentales y del modelo numérico para perfiles de velocidad axial.





El modelo numérico parece ajustarse bastante bien a los datos experimentales, hay que tener en cuenta además que las mediciones del experimento se realizaron con instrumental poco preciso (molinete). Una de las cuestiones importantes que se puede comprobar es que las velocidades son nulas en los límites del dominio, por tanto, las condiciones de contorno que se establecieron (gradiente de velocidades nulo) son adecuadas; en caso contrario habría que aumentar los límites del dominio hasta que esto se cumpla, dado que si no los resultados del modelo no serán realistas (supondrían que la hélice genera velocidades a cualquier distancia de la hélice).

## 4.3. PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL Y RADIAL.

Además de los gráficos de velocidad en dirección axial, necesarios para validar el modelo, se obtuvieron los del resto de componentes (tangencial y radial) para una mejor comprensión del comportamiento del fluido.

Se presentan estos gráficos a continuación, para adimensionalizar se ha dividido la velocidad tangencial entre el máximo de la condición de contorno (0,31 m/s) y la radial entre el valor de la condición de contorno (0,1 m/s), en cuanto a las distancias en X e Y se ha utilizado el mismo sistema que en la velocidad axial, expresando las distancias en múltiplos del diámetro de la hélice.







Ilustración 43: Perfiles de velocidad tangencial.





Ilustración 44: Perfiles de velocidad radial.





En los perfiles anteriores se puede observar como en el caso de la velocidad tangencial se produce también un efecto de difusión en la cual se tendría una forma triangular en la condición de contorno que se va deformando hasta aproximarse a una distribución gaussiana. En el caso de la velocidad radial se puede notar cómo en las zonas cercanas a la condición de contorno (valores pequeños de X) tiene un valor negativo fuera de la estela, esto quiere decir que las partículas de fluido tienden a ir hacia el interior de la misma.

También se obtuvieron los contornos de velocidad en dirección Y y Z que también sirven para obtener las componentes anteriores.



Ilustración 45: Contornos de velocidades en dirección Y (izquierda) y en dirección Z (derecha).

## 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA INTENSIDAD TURBULENTA.

En la adaptación del modelo numérico se han llevado a cabo una serie de hipótesis a cerca de los parámetros que rigen su comportamiento. Se realizaron distintas pruebas además de la original variando parámetros tales como la viscosidad del agua, velocidades tangenciales y radiales en la condición de contorno, tamaño de las celdas de la malla e intensidad turbulenta. El objetivo de estas pruebas es comprobar en qué medida influyen estos parámetros sobre los resultados finales del modelo (perfiles de velocidad) para intentar conseguir una aproximación mejor de los mismos.

Entre los parámetros anteriores se observó que la intensidad turbulenta tiene cierta influencia. Para valorar la importancia de dicho parámetro en los resultados finales se realizaron una serie de pruebas que consistieron en simulaciones con las mismas condiciones que la original Los parámetros de estas pruebas son los mismos que en el original exceptuando los del modelo de turbulencia, que pasan a ser los siguientes:

Prueba	Intensidad turbulenta (%)	k	ω
Inicial	15%	0,358	0,544
1	7,5%	0,895	0,385
2	30%	0,143	0,769
3	40%	0,255	0,888
4	60%	0,573	1,088

A continuación, se presenta un gráfico donde se comparan las 4 pruebas y el caso inicial junto con los resultados experimentales.







Ilustración 46: Comparativa entre resultados experimentales y del modelo numérico para diferentes valores de la intensidad turbulenta.





Cuando se reduce la intensidad turbulenta a la mitad se observa que se transporta menor cantidad de movimiento del interior de la estela al exterior mientras que al aumentarla sucede lo contrario, esto es debido a que la turbulencia supone un transporte convectivo (de cantidad de movimiento en este caso). Dicho transporte convectivo puede asimilarse a uno difusivo, similar al provocado por la viscosidad del fluido, aplicando la hipótesis de Boussinesq:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{\mu_i' \mu_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{ij}$$

Donde  $\tau_{ij}$  es la tensión tangencial en el fluido por efecto de la turbulencia,  $\mu_t$  es la viscosidad dinámica turbulenta, Ues la velocidad del fluido,  $\rho$  su densidad,  $\kappa$  la energía cinética turbulenta y  $\delta_{ij}$  el delta de Kronecker igual a 1 si i = j y a 0 si  $i \neq j$ . Comparando esta ecuación con la relación general entre tensiones viscosas y gradiente de velocidad en un fluido Newtoniano

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial U}{\partial y}$$

Se observa que la constante de proporcionalidad entre ratio de deformación y tensiones viscosas según la ecuación de Boussinesq es la viscosidad turbulenta o *eddy viscosity*; en la ecuación aparece la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática correspondiente (igual a la dinámica dividida por la densidad del fluido) puede obtenerse a través de los parámetros del modelo de turbulencia como:

$$v_t = \frac{k}{\omega}$$

Puesto que k y  $\omega$  dependen de la intensidad turbulenta, la viscosidad turbulenta también lo hará. Se presentan a continuación dos gráficas donde se puede observar la evolución de los parámetros del modelo de turbulencia k y  $\omega$  con la intensidad turbulenta y la relación entre viscosidad turbulenta e intensidad turbulenta. Conviene recordar que, para el caso de una hélice, el rango de intensidad turbulenta puede ser de entre el 5% y el 40% aproximadamente.









Como se puede observar, cuanto mayor es la intensidad turbulenta mayor es la viscosidad turbulenta, es decir, el flujo se comportará como si tuviese una viscosidad superior a la real del agua. Esto explica que a mayores valores de la intensidad turbulenta se produzca mayor transferencia en la cantidad de movimiento del interior de la estela hacia el exterior.

Se ha visto que la turbulencia tiene efecto sobre la distribución de velocidades en el agua, sin embargo, las variaciones tienen una importancia limitada y, como se ha comentado anteriormente, existen mediciones experimentales que sitúan la intensidad turbulenta en un intervalo de entre el 15% y el 30%. Por tanto, se empleará el valor del 15% de intensidad turbulenta en las siguientes simulaciones al aproximarse algo mejor que el de 30% en las regiones exteriores de la estela (que será donde se produzca la socavación del fondo).





# 5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CAMPO LEJANO.

A partir del caso anterior, en el que se analizó el campo cercano a la hélice, se genera este nuevo modelo para determinar las tensiones tangenciales que se producen en el fondo marino como consecuencia de la acción de la hélice.

Se aprovechan las conclusiones del análisis anterior para dar valores a ciertos parámetros como son la intensidad turbulenta o tamaño de las celdas de la malla, sin embargo, aparecen nuevos parámetros para los que será necesario obtener valores.

El caso que se pretende modelizar se corresponde con la segunda fase de los experimentos llevados a cabo en Blaaw y Van de Kaa (1975), en los que se trata el efecto de socavación inducida por las hélices.

## 5.1. GEOMETRÍA.

Se pretende reproducir con el modelo CFD el caso experimental anteriormente comentado. Dicho experimento consistió en situar el eje de la hélice a una distancia de 2 veces el diámetro de la hélice del fondo. Para este caso resulta interesante tener un dominio suficientemente extenso en la dirección X para obtener los datos de tensión tangencial, por tanto, el dominio consistirá en este caso en un prisma de base rectangular de 18 veces el diámetro de longitud, la base del prisma consiste en un rectángulo de 6Dx7D.



Ilustración 47: Esquema de la geometría del dominio.

## 5.2. MALLA.

En el caso anterior se concluyó que el tamaño de malla empleado en la simulación era suficientemente pequeño como para reproducir adecuadamente la difusión del chorro. En este caso se empleará el mismo tamaño de malla en el dominio, sin embargo, se refina en la cara inferior del dominio, puesto que se corresponde con el fondo marino y, al aplicar sobre ella la condición de contorno sólido, se va a generar en ella un gradiente de velocidades importante.

El tamaño de malla que se adopta es de 0,505 metros en dirección X, 0,438 metros en la dirección Y y 0,511 metros en la dirección Z.

Para realizar el refinado de la malla, se parte de una malla uniforme con los tamaños anteriores y se empleará el código *snappyHexMesh* para añadir capas de espesor decreciente en la cara inferior del dominio. En una primera aproximación se emplearán 10 capas con un ratio de reducción de 1,4, lo cual supone que la celda en contacto con el contorno sólido tiene un espesor de 0,015 metros.









Ilustración 48: Esquema con la disposición de la malla en la zona cercana al fondo.

## 5.3. CONDICIONES DE CONTORNO.

Serán similares a las del caso anterior, la variación consiste en considerar la superficie inferior del dominio como un contorno sólido que se corresponde con el fondo marino.

## 5.3.1. Condiciones para la velocidad.

A continuación, se comentan las condiciones de contorno aplicadas en el modelo de campo lejano, se emplea de nuevo la misma nomenclatura de OpenFOAM 1612+.

- *fixedValue*: Al igual que en el análisis del campo cercano, se aplicará en el contorno de la hélice una condición de velocidad definida por sus componentes axial, tangencial y radial. Se mantiene el mismo valor de estas componentes.
- noSlip: Se aplicará en la cara inferior del modelo para reproducir el efecto del fondo marino, se supondrá en este caso que no existe deslizamiento entre el fluido y el fondo ya que esto sólo sucede en caso de que se produzca arrastre de las partículas del mismo y, para este estudio, se quiere determinar si se cumplen o no las condiciones para que este arrastre se produzca. Se aplicará también esta condición en el lateral donde se sitúa la hélice del mismo modo que en el análisis de campo cercano.
- *zeroGradient*: Se aplica en los mismos contornos que en el caso anterior, ya se comprobó que los límites del dominio están suficientemente alejados como para que no tengan influencia sobre los resultados.







Ilustración 49: Condiciones de contorno aplicadas al modelo.

## 5.3.2. Condiciones de contorno para el modelo de turbulencia.

Los parámetros de turbulencia en la condición de contorno de la hélice ya se han discutido en apartados anteriores. Para este caso se va a fijar un valor de intensidad turbulenta del 30% y una longitud de escala turbulenta de 1,46 metros.

En los contornos sólidos (condiciones tipo *noSlip*) se debe especificar un valor inicial de los parámetros del modelo de turbulencia (k y omega), servirán únicamente como parámetros iniciales ya que el valor real se calcula en cada iteración. En ambos casos se da un valor de 0.

## 5.3.3. Tratamiento del fondo.

En la simulación del campo lejano se tiene como objetivo determinar las tensiones tangenciales generadas en el fondo (cara inferior del dominio), esto exige un tratamiento adecuado del contorno sólido que supone el fondo, relacionado con la forma de calcular los perfiles de velocidad en el interior de la capa límite que se va a generar en él.

Relacionados con la modelización de la capa límite existe un parámetro comúnmente empleado llamado  $y^+$ . Además de influir en los cálculos del perfil de velocidades y, consecuentemente, en el de las tensiones tangenciales, sirve para determinar si la malla es suficientemente fina en las proximidades del contorno como para reproducir ciertos fenómenos que se dan en el interior de la capa límite. La expresión de este parámetro es la siguiente:

$$y^+ = \frac{\rho u_t y}{\mu}$$

Donde  $u_t$  es la denominada velocidad de fricción  $u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ ,  $\tau_w$  es la tensión tangencial en el contorno sólido,  $\rho$  es la densidad del fluido e y es la distancia desde el contorno sólido hasta el punto de interés.

La velocidad en un punto cualquiera del perfil de velocidades afectado por el contorno sólido se puede expresar como función de  $y^+$  del siguiente modo:

$$\frac{U}{u_t} = u^+ = f(y^+)$$





La función  $f(y^+)$  que se utilizará para calcular el perfil de velocidades depende a su vez del valor de  $y^+$ , cuanto menor sea mayor efecto va a tener la viscosidad en el valor de la velocidad mientras que si  $y^+$  aumenta también lo hará la influencia de los efectos turbulentos. De este modo, se pueden distinguir las siguientes zonas dentro de la capa límite:

• La más cercana al contorno es la sub-capa viscosa o lineal (*viscous sublayer*), en la cual la tensión tangencial es constante e igual a la ejercida en el contorno por el fluido (aunque de sentido contrario) de modo que la velocidad varía linealmente con la distancia al contorno. Esto se debe a que las fuerzas viscosas predominan sobre las turbulentas. Se da en la zona de  $y^+ < 5$  y el perfil de velocidades se puede expresar del siguiente modo:

$$U = \frac{\tau_w y}{\mu}$$

O lo que es equivalente:

$$u^+ = y^+$$

- A continuación, está la *buffer layer*, en la cual las fuerzas viscosas y turbulentas tienen órdenes de magnitud similares. Se trata de una transición entre la sub-capa lineal y la logarítmica. Se da en el intervalo  $5 < y^+ < 30$  aproximadamente.
- Posteriormente se encuentra la sub-capa logarítmica (*log-law sublayer*) donde la tensión tangencial varía con la distancia al contorno y el perfil de velocidades sigue una función logarítmica. En este caso dominan los efectos turbulentos (tensiones de Reynolds). Se extiende en el intervalo  $30 < y^+ < 500$  y el perfil de velocidades se puede expresar como:

$$u^{+} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^{+}) + B = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^{+})$$

Donde  $\kappa$  es la constante de von Karman de valor 0,4, B es una constante de valor 5,5 y E otra constante de valor 9,8. Estos valores de las constantes son para fondos lisos, en caso de tratarse de fondos rugosos el valor de B disminuye (por tanto, E también varía).

Finalmente se encuentra la capa exterior (*outer layer*) donde el perfil de velocidades sigue una ecuación denominada *velocity-defect law* o *law of the wake*. Es una zona dominada por los efectos inerciales y en la que prácticamente no existe influencia de los efectos del contorno sólido tanto viscosos como turbulentos. En esta parte de la capa límite, la forma más adecuada de describir el perfil de velocidades es en función de la relación entre la posición (*y*) y el espesor total de la capa límite (δ), de modo que:

$$\frac{U_{max} - U}{u_t} = g\left(\frac{y}{\delta}\right)$$

Donde  $U_{max}$  es la velocidad máxima en la capa límite, es decir, en la velocidad en el exterior de la misma. Imponiendo condiciones de tangencia y continuidad con la ley logarítmica de la sub-capa anterior en Tennekes y Lumley (1972) se obtiene la siguiente expresión:

$$g\left(\frac{y}{\delta}\right) = \frac{U_{max} - U}{u_t} = -\frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + A$$

Donde A es una constante.

En la ilustración siguiente se puede observar una comparativa entre las leyes teóricas de las sub-capas viscosa y logarítmica expuestas anteriormente y datos experimentales,





se observa una zona de transición en la que los resultados experimentales se ajustan peor a las dos leyes teóricas, esta zona se corresponde con la *buffer layer*.



Ilustración 50: Variación de la velocidad (u+) con la distancia al contorno sólido (y+) en escala logarítmica. Se diferencian claramente las zonas de sub-capa viscosa y sub-capa logarítmica. Imagen tomada de H. K. Versteeg (2007).

Como se puede observar, el flujo en el interior de las capas límites presenta bastante complejidad, además la sub-capa viscosa tiene un espesor bastante pequeño (del orden de milímetros o centímetros dependiendo del caso) donde el gradiente de velocidades es muy alto. Todo esto obliga a que, para reproducir adecuadamente la capa límite, se deba hacer un mallado muy fino cerca de los contornos sólidos y, además, emplear un modelo laminar para la sub-capa viscosa, lo que supone un incremento notable en tiempo de cálculo. Sin embargo, se han desarrollado una serie de funciones conocidas como *wall functions* que aproximan el perfil de velocidades en el interior de la capa límite con la ley logarítmica, de modo que, a cambio de reducir la precisión en el cálculo de las tensiones tangenciales (función del gradiente de velocidad) se disminuye el tiempo de cálculo.

En este caso, la determinación de las tensiones tangenciales no exige el nivel de precisión que aporta reproducir las sub-capas como sí sucedería si se quieren reproducir desprendimientos de capa límite o fuerzas de rozamiento sobre un perfil aerodinámico, por ejemplo. Se opta por utilizar la función aproximada con objeto de mejorar el tiempo de cálculo, haciendo el método más aplicable a problemas ingenieriles.

Parámetro	Valor	
Diámetro de hélice	7,3 m	
Velocidad axial	1,03 <i>m/s</i>	
Velocidad tangencial	0,31 <i>m/s</i>	
Velocidad radial	0,1 <i>m/s</i>	
Intensidad turbulenta	15 %	
Longitud de escala turbulenta	1,46 m	
К	$0,036 \ (m/s)^2$	
Omega	$0,544  s^{-1}$	
Posición del eje	[0; 10.95; 25,55]	
Dimensiones del dominio	131.4 x 43.8 x 51,1 <i>m</i>	
Tratamiento del fondo	Wall Function (logarítmica)	

## 5.4. RESUMEN DE PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN.





# 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS DE CAMPO LEJANO.

Una vez realizada la simulación se extraen los resultados de interés. Al igual que en el análisis del campo cercano de la hélice, se presentan primero los resultados de campos de velocidad para comprobar si el funcionamiento del modelo es razonable, posteriormente se presentan los gráficos de perfiles de velocidades. Puesto que en este caso se busca obtener las tensiones tangenciales, se exponen de igual forma lo mapas de tensiones tangenciales en el fondo y un perfil de tensiones tangenciales a lo largo de la línea central del fondo.

En este modelo se va a analizar la influencia de algunos factores relacionados con el tratamiento del fondo del dominio, concretamente se trata de hacer un refinado de la malla en dicha zona suficientemente fino como para que no tenga influencia notable en los resultados. El refinado de la malla, como se ha explicado en el apartado correspondiente, consiste en añadir una serie de capas cuyo espesor disminuye al acercarse al fondo, los parámetros que rigen esta transición entre el tamaño en la zona sin refinar y el de la celda en contacto con el fondo son el número de capas y el ratio de disminución del tamaño entre capas.

En una primera aproximación al problema se dispuso un tamaño de celda en el contorno sólido de 0,015 metros y una transición de 10 capas entre este tamaño y el de la malla en el resto del dominio. Al obtener los resultados de la simulación se pudo comprobar que el valor de y+ era excesivamente grande (243) lo cual conduce a resultados poco precisos. Se realizaron más pruebas hasta llegar a un valor de y+ por debajo de 50 (48,9), suficientemente pequeño para aplicar las *wall functions* con precisión. El tamaño final de la celda en el contorno es de 0.005 metros (3 veces más pequeño que el anterior) y la transición se realiza en 30 capas con un ratio de disminución de 1.16 entre capas consecutivas. Recordar que, para poder simular la capa límite con las sub-capas que la forman, el valor de y+ en la primera celda debe estar por debajo de 5.

## 6.1. CONTORNOS DE VELOCIDAD.

A continuación, se muestran diferentes mapas de velocidad en distintos planos del dominio, estos contornos permiten hacerse una idea de la magnitud de la velocidad y de si los resultados son razonables desde un punto de vista físico.

## 6.1.1. Contornos de velocidad en el plano longitudinal.

El plano de corte es perpendicular al eje Z y está centrado en el dominio. Se puede observar cómo en este caso ya no existe simetría axial debido a la introducción del fondo y posición de la hélice.







AY Z

Ilustración 51: Contornos de velocidad en el plano medio longitudinal.





## 6.1.2. Contornos de velocidad en planos transversales.

Las imágenes siguientes se corresponden con los contornos en planos perpendiculares al eje X a distancias de 1, 9 y 17 veces el diámetro del plano de la hélice. Como se puede observar la distribución de velocidades tiene simetría axial en la zona cercana a la hélice, sin embargo, al alejarse de ella e ir apareciendo influencia del fondo, esta simetría desaparece. El confinamiento que produce el fondo contribuye al aumento de las velocidades en su proximidad.









Ilustración 52: Contornos de velocidad en planos transversales.





## 6.1.3. Líneas de corriente.

Al igual que en el campo cercano se presentan las líneas de corriente del resultado, donde se puede observar el movimiento helicoidal que describen las partículas del fluido. Este movimiento está producido por la componente tangencial que se introdujo en la condición de contorno y, como se verá en los resultados siguientes, tiene influencia en la distribución de tensiones tangenciales en el fondo del dominio.







Ilustración 53: Líneas de corriente generadas por la hélice.

Julio García-Maribona López-Sela

Z





## 6.2. GRÁFICOS DE VELOCIDAD.

En la ilustración siguiente se muestran los gráficos de perfiles de velocidad a distintas distancias de la hélice, se emplea el mismo sistema adimensionalizado que en el análisis del campo cercano.

Se puede observar la influencia del fondo en los perfiles de velocidades a partir del punto en que el fondo empieza a confinar el flujo, el cual se encuentra entre 3 y 4 veces el diámetro aproximadamente.

Notar que los perfiles no presentan simetría respecto al eje axial de la hélice, como es lógico, dado que en su parte superior no tienen el efecto de confinación del fondo.

La zona cercana al fondo se tratará en más detalle en la aplicación práctica para la obtención de coeficientes, puesto que se necesita aumentar la distancia entre puntos de muestreo empleada para extraer los datos del modelo.





Ilustración 54: Gráfico con perfiles de velocidad del análisis de campo lejano.




### 6.3. CONTORNOS DE TENSIÓN TANGENCCIAL EN EL FONDO.

En la primera ilustración se muestra el valor de la tensión tangencial en los diferentes puntos del fondo visto en planta, que se corresponde como ya se ha explicado con la cara inferior del dominio.

Los valores de tensión tangencial de la escala están divididos por la densidad del fluido, para obtener la tensión tangencial en pascales basta con multiplicar el valor por la densidad del agua.

Se observa como la distribución no es totalmente simétrica, esto es debido al carácter helicoidal del flujo generado por las hélices (en contraste con el flujo generado por un *jet*, en el que sólo existe componente axial como ya se ha comentado).

En la ilustración siguiente se muestran los vectores de tensión tangencial, notar que las tensiones tangenciales están calculadas en el fluido, las actuantes sobre el fondo tienen el mismo módulo, pero sentido contrario a las del dibujo. Se ve también la influencia del carácter helicoidal del flujo en la dirección de los vectores.

Como se puede observar, el valor máximo de tensión tangencial es de 0,5 pascales una vez multiplicado por la densidad del agua.









Ilustración 55: Contornos de tensión tangencial sobre el fondo.









Ilustración 56: Vectores de tensión tangencial en el fluido en el plano del fondo.





### 6.4. PERFIL DE VELOCIDADES TANGENCIALES EN EL FONDO.

Se obtiene el siguiente perfil de tensiones tangenciales a lo largo de la línea media del fondo que, como se puede observar en los contornos anteriores, incluye el valor máximo. Al igual que en gráficos anteriores, la distancia sobre el eje X se presenta adimensionalizada con el diámetro de la hélice. Del mismo modo que en los contornos de tensión tangencial, su valor está dividido entre la densidad del fluido.

En los primeros metros prácticamente no hay tensión tangencial puesto que la estela de la hélice no se ha difundido lo suficiente por los fenómenos comentados en el análisis del campo cercano. Aproximadamente en 3,5 veces el diámetro de la hélice (25,55 metros en este caso) se produce el contacto de la estela con el fondo, aumentando la tensión tangencial hasta un máximo de 0,5 pascales en una distancia a la hélice de 10,5 veces el diámetro (76,65 metros en este caso), a partir de esta posición la tensión tangencial seguirá disminuyendo al disminuir el valor de la velocidad en la estela de la hélice.

La distancia a la que la estela empieza a generar tensiones tangenciales en el fondo será superior conforme aumente la distancia de la hélice al fondo, que en Jian Hao Hong et al. (2013) se denomina *offset ratio*. Lo mismo sucede con el punto de máxima tensión tangencial y con el valor de la tensión máxima.





Ilustración 57: Perfil de tensiones tangenciales en la línea central del fondo.





### 6.5. CONTORNOS DE $y^+$ .

Como se indicó anteriormente, el valor de  $y^+$  máximo para la malla refinada con 31 capas y ratio de disminución 1,16 es de 48,9. A continuación se muestran los contornos de  $y^+$  donde se observa que, efectivamente, este es el valor máximo.

Como ya se ha indicado este parámetro tiene gran importancia a la hora de valorar la bondad de la malla cerca del contorno sólido. Para emplear *wall functions* se recomienda que esté por encima de 30 y por debajo de 100, como es el caso.

Recordando que  $y^+$  tiene la siguiente expresión:

$$y^+ = \frac{\rho u_t y}{\mu}$$

Y que  $u_t$  depende a su vez de la raíz cuadrada de la tensión tangencial en el fondo:

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}},$$

Permaneciendo el resto de parámetros constantes en toda la superficie del fondo (misma viscosidad, densidad y fondo plano),  $y^+$  depende directamente de la raíz cuadrada de la tensión tangencial.

Cabe destacar también que la tensión tangencial es el resultado que se pretende conseguir con el modelo, por tanto, el valor de  $y^+$  se puede conocer una vez terminada la finalización si bien puede estimarse con anterioridad.









Ilustración 58: Valor de y<sup>+</sup> en el fondo





# 7. APLICACIÓN PRÁCTICA.

El objeto de este apartado es enmarcar el procedimiento anteriormente descrito en los métodos de cálculo disponibles, facilitando su aplicación en problemas de ingeniería.

En primer lugar, se realiza una comparación de los resultados obtenidos con los que proponen los métodos que se comentaron en el estado del arte, proponiendo correcciones a los coeficientes que se emplean en los mismos.

Posteriormente se presenta una metodología a seguir para tratar el problema con CFD, donde se realizarán cálculos similares a los elaborados en el presente trabajo y se aplicará el ábaco de Shields para determinar si se producirá socavación o no, así como el tamaño de árido a disponer en caso de que se produzca.

### 7.1. ADAPTACIÓN DE LOS MÉTODOS DISPONIBLES.

El punto de conexión entre los métodos actualmente disponibles y el que se presenta en este trabajo es la determinación de la velocidad en la proximidad del fondo, en el exterior de la capa límite.

A continuación, se calcula la velocidad en la proximidad del fondo por los dos métodos del Informe PIANC 180-2015 (alemán y danés) y por el propuesto en las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM). Las fórmulas a aplicar se presentaron anteriormente en el Estado del Arte con una descripción completa de cada método. Finalmente, se obtendrá el valor obtenido con el modelo de Dinámica Computacional de Fluidos.

### 7.1.1. Método alemán.

La velocidad en el fondo generada por el sistema principal de propulsión se calcula con la siguiente ecuación.

$$V_{b max} = EV_0 \left(\frac{h_p}{D_p}\right)^{-1}$$

Donde  $V_0 = 1,03 m/s$ , E = 0,42 al no haber considerado el efecto del timón,  $h_p = 1,5 \cdot 7,3 = 10,95 m$  y  $D_p = 7,3 m$ .

Se obtiene como resultado  $V_{b max} = 0,288 m/s$ 

#### 7.1.2. Método danés.

En este caso la fórmula es similar aplicando un coeficiente entre 0,2 y 0,3 en vez del coeficiente E anterior, no se diferencia entre casos con y sin influencia del timón.

$$V_{b max} = (0.2 \sim 0.3) V_0 \frac{D_p}{h_p}$$

Donde los valores de velocidad y geometría son los mismos que en el cálculo anterior. Resulta una velocidad en el fondo $V_{b max} = 0,137 \sim 0,206$  m/s dependiendo del valor que se tome. Como se puede observar el resultado difiere del anterior.

### 7.1.3. Método de la ROM:

Se repite el mismo formato en la ecuación, sin embargo, en este método se emplean dos coeficientes:



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. TRABAJO FIN DE MÁSTER Introducción.



$$V_{m \acute{a}x \ h \acute{e}lices, fondo} = C_1 C_2 \overline{V_0} \frac{D_0}{h_h}$$

Se ha empleado la nomenclatura original del método,  $h_h$  es igual que  $h_p$  y  $D_0$  lo mismo que  $D_p$  y  $\overline{V_0}$  equivale a  $V_0$ , por tanto, la diferencia entre este método y los anteriores está únicamente en los coeficientes. El coeficiente  $C_1$  tiene un valor de 0,4 y el  $C_2$  de 1,1 (atraque en paralelo) de acuerdo con lo indicado en el método.

El resultado de velocidad en el fondo es  $V_{máx hélices, fondo} = 0,302 m/s$ 

#### 7.1.4. Modelo CFD.

Para obtener este resultado se representa en un gráfico el perfil de velocidad en la posición donde mayor tensión tangencial se produce, que es a una distancia de 11 veces el diámetro (80,3 metros), en este caso sólo interesa la zona cercana al fondo por lo que se representa únicamente la zona hasta 1 metro del fondo (0,14 D). En el gráfico obtenido se observar un punto a partir del cual la velocidad comienza a disminuir rápidamente, es el punto donde comienza la capa límite.



Ilustración 59: Perfil de velocidades en el fondo.

El valor de velocidad a partir del cual empieza la capa límite está entre 0,2 y 0,23 m/s. Este intervalo concuerda aproximadamente con los valores proporcionados con los métodos. Siguiendo la estructura de las fórmulas de los métodos anteriores, el intervalo del valor del coeficiente para calcular la velocidad en el fondo es:

$$C = \frac{V_{b \max}}{V_0} \frac{h_p}{D_p} = (0.2 \sim 0.23) \frac{10.95}{7.3} = 0.3 \sim 0.35$$

#### 7.1.5. Resumen.

En la tabla siguiente se incluyen los coeficientes para calcular la velocidad en el fondo, aplicables a cualquier caso en que se trate de una única hélice, sin influencia del timón ni de muelles laterales.



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. TRABAJO FIN DE MÁSTER Introducción.



Método	Coeficiente
Alemán	0,42
Danés	0,2 a 0,3
R.O.M.	0,44
CFD	0,3 a 0,35

Como se puede observar, los valores obtenidos con el modelo CFD son bastante próximos a los proporcionados por los distintos métodos analíticos.

### 7.2. METODOLOGÍA COMPLETA CON CFD.

En este apartado se propone un proceso mediante el cual es posible tomar decisiones sobre si es necesario o no disponer protección contra socavación en el fondo, así como decidir el tipo de protección a disponer y su dimensionamiento. La potencia de este método permite aplicarlo a geometrías de gran complejidad y añadir posibles interacciones con elementos tales como muelles para diferentes ángulos de incidencia, el timón del barco, un fondo no horizontal, combinación de las estelas de varias hélices, etc. Las conclusiones a las que se llega sobre parámetros importantes del modelo, forma de introducir la hélice y otros aspectos de la simulación son completamente aplicables a estos nuevos casos, aportando gran flexibilidad al método y evitando tener que realizar nuevos análisis de sensibilidad sobre los aspectos contemplados en este trabajo.

El procedimiento para realizar el modelo ya se ha descrito anteriormente y puede estructurarse como un caso genérico de aplicación de un modelo numérico en las siguientes fases:

- Geometría del caso.
- Discretización del espacio.
- Condiciones de contorno.
- Propiedades del fluido.
- Cálculo.
- Obtención y tratamiento de los resultados.

El modelo CFD permite, como ya se ha demostrado, obtener las tensiones tangenciales generadas en el fondo, éste es el resultado principal del modelo a efectos de cálculos de socavación. Una vez obtenida la tensión tangencial máxima se emplea el ábaco de Shields para determinar si se va a generar o no socavación y para decidir el tamaño de árido de la protección si fuese necesaria.

#### 7.2.1. Aplicación al caso de estudio.

En el modelo realizado en el presente estudio se ha obtenido un valor máximo de la tensión tangencial en el fondo de  $4,951 \cdot 10^{-4} m^2/s^2$ , para obtener el valor de esta tensión en Pascales se debe multiplicar por la densidad del agua, para la que se toma un valor de  $1000 kg/m^3$ , se obtiene entonces una tensión máxima en el fondo de 0,495 Pa.

Al ábaco de Shields se entra con dos parámetros:

• Tensión cortante adimensional: Expresa la relación entre las fuerzas que tienden a mover la partícula (tensión tangencial producida por el flujo) y las que la estabilizan (su propio peso sumergido). Por tanto, este parámetro tiene la siguiente expresión:





Introducción.

$$\tau = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w)d_s}$$

Número de Reynolds granular: Expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en el entorno de las partículas.

$$Re^* = \frac{U^*d_s}{v}$$

Donde  $d_s$  es el diámetro de las partículas del fondo,  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua

y  $U^*$  la velocidad de corte en el fondo, que puede calcularse como  $U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_{uv}}}$ 

Está relacionado con el tamaño relativo de las partículas y la sub-capa laminar distinguiéndose tres posibles tipos de flujo:

- Turbulento rugoso: la altura del grano es mayor que la sub-capa límite laminar, 0 se da para valores de Re\* mayores de 70, a partir de dicho valor la tensión cortante adimensional necesaria para producir el movimiento de la partícula no depende de  $Re^*$  y tiene un valor de 0,056.
- Turbulento liso: la altura de la sub-capa viscosa es superior a la de las partículas, se da para  $Re^*$  menores de 5.
- Intermedio: se da entre los valores de  $Re^*$  de 5 y 70. 0

En este caso se parte del valor conocido de la tensión tangencial en el fondo  $\tau_0 = 0,495 Pa$ . Se va a considerar en este caso un fondo compuesto por arena de diámetro  $d_s = 0,1 mm$  y una densidad de  $\rho_s = 1600 \ kg/m^3$ . Convirtiendo todas las unidades al sistema internacional y aplicando la ecuación anterior se obtiene  $\tau = 0,825$ .

Por otra parte, se calcula  $Re^*$ . Aplicando  $U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}}$  se obtiene  $U^* = 0.022 m/s$ . Considerando una viscosidad cinemática del agua de  $10^{-6} m^2/s$  resulta  $Re^* = 2,2$ .

Se entra al gráfico con estos dos valores y se observa que el punto está por encima de la línea de estabilidad, por tanto, se producirá movimiento de las partículas. Esto quiere decir que existe riesgo de socavación y será necesaria una protección.



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. TRABAJO FIN DE MÁSTER Introducción.





Ilustración 60: Diagrama de Shields.

Cabe preguntarse en este punto qué zonas del fondo van a resultar erosionadas y en cuáles la granulometría del material natural es suficiente para evitarla. El cálculo de la tensión tangencial a partir de la cual se produce socavación puede abordarse con el ábaco de Shields, determinar el valor exacto exige un proceso iterativo, ya que las variables de los ejes dependen una de otra. En este caso se ha considerado como valor límite una tensión tangencial de 0,24 Pascales, para la cual el número de Reynolds es de 1,55 quedando en la zona de no movimiento del gráfico.

Empleando el software de postproceso se extrae la zona del fondo del dominio estudiado donde la tensión tangencial es superior a 0,24 (luego es susceptible de sufrir problemas de socavación) obteniéndose la figura siguiente.



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. TRABAJO FIN DE MÁSTER Introducción.







Ilustración 61: Zona de posible erosión en el fondo del dominio. Se ha indicado en color morado la zona donde no se producirá socavación y en escala de colores (en función de la magnitud de los vectores de tensión tangencial) la zona problemática.





### 8. CONCLUSIONES.

Con base en los resultados anteriormente expuestos, se extraen las siguientes conclusiones:

- El modelo propuesto en el presente trabajo permite reproducir de una forma suficientemente aproximada el flujo generado por una hélice de cara al análisis de la socavación inducida.
- La intensidad turbulenta juega un papel fundamental en la hidrodinámica de la estela de una hélice, al ser la principal responsable de la transferencia de cantidad de movimiento del interior al exterior de la estela. Las componentes de velocidad tangencial y radial también contribuyen a esta transferencia, aunque en menor medida.
- Se ha obtenido una horquilla de valores para el coeficiente empleado por los métodos analíticos que relaciona diámetro de la hélice, distancia al fondo y velocidad de salida.
- El análisis del campo lejano permite obtener las tensiones tangenciales producidas en el fondo y distintos resultados derivados de ellas, como el diseño de protección o las zonas afectadas por la erosión.
- En el análisis del campo lejano el modelado de la capa límite es el principal factor adicional a tener en cuenta.
- La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) permite abordar el problema de la socavación de forma integral o incluyéndose dentro de las fases de los métodos ya existentes con los coeficientes calculados.

# 9. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.

Las posibilidades de trabajo futuro en este campo son muy amplias, pudiendo ir encaminadas a lograr mayor eficiencia en el modelo numérico o mejorar los resultados e incluso generar más información de interés. Se proponen las siguientes posibilidades de mejora:

- Aplicación de un modelo de partículas como *Discrete Element Method* (DEM) acoplado al modelo CFD para estudiar el perfil resultante de la socavación. Este perfil podrá compararse con los publicados en diferentes artículos, como los citados en el Estado del Arte del presente trabajo.
- Empleo de un modelo para la hélice más complejo, como el *Blade Element Momentum* (BEM), para reproducir la hidrodinámica de la estela con mayor precisión.
- Variar las geometrías del estudio para adaptarlas a diferentes situaciones, como puede ser el uso de doble hélice, incidencia oblicua de la estela sobre el muelle, etc.
- Realizar un análisis transitorio para determinar la influencia de las variaciones en la velocidad de salida de la hélice.





### Bibliografía

- B.Phillips, A., R.Turnock, S., & Furlong, M. (2009). Evaluation of manoeuvering coefficients of a sefl-propelld ship using blada element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier-Stokes flow solver. *Ocean Engineering*.
- Bakker, A. (2012). *The Colorful Fluid Mixing Gallery*. Retrieved from http://www.bakker.org/cfm.
- Blaaw., H., & Kaa, E. v. (1978). Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvering ships. *Delft Hydraulics Laboratory*.
- Chao-Tsung Hsiao, Jin-Keun Choi, Eric G. Paterson, Georges L.Chahine. (2007). Numerical and Experimental Study of a Horizontal Jet Below a Free Surface. 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodinamics.
- G.A. Hamill, H.T. Johnston, D.P. Stewart. (1999). Propeller Wash Scour Near Quay Walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.*
- Gobierno de España, Ministerio de Fomento. (2012). *Recomendaciones para Obras Marítimas* (*ROM*) Serie 2, Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y *amarre.* Puertos del Estado.
- Jian-Hao Hong, Yee-Meng Chiew, M.ASCE, Nian-Sheng Cheng. (2013). Scour Caused by Propeller Jet. *Journal of Hydraulic Engineering.*
- N.Abbas, N.Kornev, I.Shevchuk, P.Anschau. . (2015). CFD prediction of unsteady forces on marine propellers caused by the wake nonuniformity and nonstationarity. *Ocean Engineering*.
- PIANC. (2015). Gudelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. Bruxelles, Belgique.
- Stephen R. Turnock, Alexander B. Phillips, Joe Banks, Rachel Nicholls-Lee. (2011). Modeling tidal curren turbine wakes using a coupled RANS-BEMT approach as a tool for analysing power captura of arrays of turbines. *Ocean Engineering*.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computationa Fluid Dynamics*. Essex: Pearson Education.
- Vesting, F. (2012). Implementation for lifting line propeller representation. *CFD with OpenSource software*.
- W.Lam, G.A.Hamild, Y.C. Song, D.J. Robinson, S.Raghunathan. (2011). A review of thaae equations used to predict the velocity distribution within a ship's prepeller jet. *Ocean Engineering*.





# **UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

### ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER.

# MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.

# **RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER**

VERSIÓN EN ESPAÑOL

AUTOR: Julio García-Maribona López-Sela DIRECTOR: Javier López Lara

Julio, 2017





**Título:** Análisis de la socavación inducida por hélices durante las maniobras de atraque y desatraque.

Autor: Julio García-Maribona López-Sela.

Director: Javier López Lara.

Convocatoria: Julio del 2017.

Palabras clave: socavación, erosión, hélices, estela, CFD.

### Planteamiento del problema.

El tráfico marítimo ha venido sufriendo una evolución a lo largo de los últimos años para adaptarse a las necesidades del transporte de mercancías y pasajeros, los barcos han ido aumentando en tamaño para aprovechar la economía de escala. El incremento del tamaño ha ido acompañado por una mejora en los sistemas de propulsión. En la actualidad, los nuevos sistemas de propulsión con mayor potencia y distintas configuraciones han generado problemas en la infraestructura portuaria debido a la capacidad erosiva de las estelas de las hélices, la socavación resultante puede comprometer la funcionalidad e, incluso, la estabilidad del muelle. Por tanto, en el diseño de las estructuras portuarias susceptibles de sufrir este efecto, deberá valorarse la necesidad de disponer una protección.

Los métodos de cálculo disponibles a la hora de abordar el problema de la socavación inducida por hélices pueden clasificarse en:

- Analíticos, que emplean diferentes ecuaciones para determinar si va a haber problemas de socavación inducida por hélices. Resulta necesaria la introducción de simplificaciones para abordar el cálculo, así como el uso de coeficientes procedentes de distintos experimentos; permiten un análisis bastante simplificado.
- Empíricos, que utilizan montajes experimentales. Permiten analizar una mayor variedad de configuraciones, sin embargo, son más costosos tanto en tiempo como en dinero al exigir la realización de experimentos específicos para cada caso.

En las últimas décadas se han desarrollado nuevas herramientas para predecir el comportamiento de los fluidos bajo distintas condiciones, una de estas herramientas es la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD por sus siglas en inglés). Los inconvenientes de su uso son la complejidad de elaborar los modelos numéricos y el coste computacional de su resolución (mayor cuanto más complejo es el modelo). No obstante, este método tiene un coste menor que los empíricos y es más preciso que los analíticos, por tanto, representa una buena alternativa a los métodos ya existentes.

### Desarrollo de la solución.

En el presente trabajo, se plantea el análisis del problema de la socavación inducida por hélices utilizando CFD. Se pretende conseguir un modelo suficientemente simplificado para limitar tanto el tiempo como la potencia de cálculo requeridos, facilitando su aplicación.

Los modelos CFD comprenden una gran cantidad de variables que deben definirse adecuadamente para lograr resultados precisos. La obtención de algunas de estas variables es



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MASTER (ESPAÑOL).



bastante compleja, por lo que es fundamental la validación del modelo comparando sus resultados con los obtenidos por vía experimental.

La metodología seguida en el presente trabajo consiste en una primera fase de validación, donde se analiza el flujo generado por la hélice sin influencia del fondo y se compara con datos experimentales obtenidos en las mismas condiciones, ajustando los parámetros de mayor influencia para que concuerden. Posteriormente, se añade al modelo ya validado el efecto del fondo para determinar las tensiones tangenciales producidas en el mismo. Finalmente, se interpretan los resultados del este segundo análisis para determinar la necesidad de protección.

En el primer análisis se observó la gran influencia de la intensidad turbulenta generada por la hélice en los perfiles de velocidad generados, ya que su valor es difícil de determinar y los resultados dependen en gran medida de ella. Buscando el mejor ajuste con los perfiles obtenidos del experimento, se estimó su valor entorno al 30%. Con este valor se llegó a un buen ajuste, dando el modelo por validado.

En el segundo análisis las principales variables a determinar están relacionadas con la disposición del mallado en la zona cercana al fondo para modelizar adecuadamente la capa límite. El parámetro a ajustar en este caso es el  $y^+$ , que debe estar entre 30 y 100. Con un refinado de la zona de 30 capas y un ratio de disminución de 1,16 se logra un máximo del  $y^+$  de 49.

Una vez se cuenta con un modelo suficientemente preciso se extraen los resultados de interés para analizar el problema de la socavación. En primer lugar, se determina el coeficiente que determina la relación entre la velocidad máxima en el fondo (en el exterior de la capa límite), la velocidad de salida de la hélice y el ratio entre diámetro de hélice y distancia al fondo, este coeficiente se emplea en la mayoría de métodos analíticos disponibles; se obtuvo un valor de entre 0,3 y 0,35 mientras que el empleado por otras metodologías varía entre 0,2 y 0,44.

Posteriormente se emplea el ábaco de Shields para determinar si se va a producir o no socavación con una determinada granulometría, así como la granulometría necesaria para evitar que esto suceda; empleando software de post-proceso se obtiene una imagen de la zona afectada por la erosión para una granulometría determinada.

### Conclusiones.

Con base en los resultados obtenidos en el trabajo, se extraen las siguientes conclusiones:

- El modelo propuesto en el presente trabajo permite reproducir de una forma suficientemente aproximada el flujo generado por una hélice de cara al análisis de la socavación inducida.
- La intensidad turbulenta juega un papel fundamental en la hidrodinámica de la estela de una hélice, al ser la principal responsable de la transferencia de cantidad de movimiento del interior al exterior de la estela. Las componentes de velocidad tangencial y radial también contribuyen a esta transferencia, aunque en menor medida.
- Se ha obtenido una horquilla de valores para el coeficiente empleado por los métodos analíticos que relaciona diámetro de la hélice, distancia al fondo y velocidad de salida.
- El análisis del campo lejano permite obtener las tensiones tangenciales producidas en el fondo y distintos resultados derivados de ellas, como el diseño de protección o las zonas afectadas por la erosión.
- En el análisis del campo lejano el modelado de la capa límite es el principal factor adicional a tener en cuenta.



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MASTER (ESPAÑOL).



• La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) permite abordar el problema de la socavación de forma integral o incluyéndose dentro de las fases de los métodos ya existentes con los coeficientes calculados.

### Bibliografía.

- B.Phillips, A., R.Turnock, S., & Furlong, M. (2009). Evaluation of manoeuvering coefficients of a sefl-propelld ship using blada element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier-Stokes flow solver. *Ocean Engineering*.
- Bakker, A. (2012). *The Colorful Fluid Mixing Gallery*. Retrieved from http://www.bakker.org/cfm.
- Blaaw., H., & Kaa, E. v. (1978). Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvering ships. *Delft Hydraulics Laboratory*.
- Chao-Tsung Hsiao, Jin-Keun Choi, Eric G. Paterson, Georges L.Chahine. (2007). Numerical and Experimental Study of a Horizontal Jet Below a Free Surface. 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodinamics.
- G.A. Hamill, H.T. Johnston, D.P. Stewart. (1999). Propeller Wash Scour Near Quay Walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.*
- Gobierno de España, Ministerio de Fomento. (2012). *Recomendaciones para Obras Marítimas* (*ROM*) Serie 2, Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre. Puertos del Estado.
- Jian-Hao Hong, Yee-Meng Chiew, M.ASCE, Nian-Sheng Cheng. (2013). Scour Caused by Propeller Jet. *Journal of Hydraulic Engineering.*
- N.Abbas, N.Kornev, I.Shevchuk, P.Anschau. . (2015). CFD prediction of unsteady forces on marine propellers caused by the wake nonuniformity and nonstationarity. *Ocean Engineering*.
- PIANC. (2015). Gudelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. Bruxelles, Belgique.
- Stephen R. Turnock, Alexander B. Phillips, Joe Banks, Rachel Nicholls-Lee. (2011). Modeling tidal curren turbine wakes using a coupled RANS-BEMT approach as a tool for analysing power captura of arrays of turbines. *Ocean Engineering*.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computationa Fluid Dynamics.* Essex: Pearson Education.
- Vesting, F. (2012). Implementation for lifting line propeller representation. *CFD with OpenSource software*.
- W.Lam, G.A.Hamild, Y.C. Song, D.J. Robinson, S.Raghunathan. (2011). A review of thaae equations used to predict the velocity distribution within a ship's prepeller jet. *Ocean Engineering*.





# **UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

### ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE SANTANDER.

# MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.

### **RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MASTER**

VERSIÓN EN INGLÉS

AUTOR: Julio García-Maribona López-Sela DIRECTOR: Javier López Lara

Julio, 2017



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER (INGLÉS).



Title: Analysis of propeller induced scour during berthing maneuvers.

Author: Julio García-Maribona López-Sela.

Director: Javier López Lara.

Call: July 2017.

Key words: Scour, erosion, propeller, wake, CFD.

### Problem statement.

Maritime traffic has been evolving along the last years to adapt to shipping demands. Vessels have been growing to take advantage of scale economy. The increment in size of ships is followed by the develop of propulsion systems. Nowadays, there are new propulsion systems with more power and different settings which have generated problems in the infrastructure of the port, due the erosive power of propeller's wakes. The scour might jeopardize dock's functionality and, also, stability. Therefore, this effect must be taken in consideration when designing port's infrastructure determining if protection is needed or not.

There exist some methods to calculate the protection needed to avoid propeller induced scour. They can be classified in the following groups:

- Analytic methods, that use different equations to predict if propeller induced scour will be generated or not. There is a need to introduce some simplifications to calculate, as well as use experimental coefficients. They can be used for simplified analysis of the problem.
- Empirical methods, that use experimental sets. They allow for a more detailed analysis of complex situations but, on the other hand, they are more expensive in terms of time and price as a specific experimental set up is needed for each case.

In the last decades, new methods to predict the behavior of fluids under different conditions have been developed, one of these methods is Computational Fluid Dynamics (CFD). The main disadvantage is that it requires to elaborate complex models and it also has a high computational cost (higher as the model gets more complex). Despite of this, CFD is an interesting tool for solving complex problems as it is cheaper than empirical methods and more precise than analytic ones so it represents a suitable alternative for analytical and experimental methods.

### Solution development.

In this study, an approach to the propeller induced scour by using CFD is set. The objective is to reach a simply enough model to reduce the computational cost and facilitate the application of CFD models to face this problem.

CFD models include many parameters that must be determined to obtain precise results. The determination of some of these parameters is quite complex, so the validation of the model, comparing with experimental results, is very important to ensure its accuracy.

The methodology followed in this job consist in two phases. In the first one, the flow generated by a propeller is modelized without the influence of the seabed and results are compared with experimental ones obtained under the same conditions. Most influential parameters are determined and adjusted to fit the experimental results. Secondly, the effect of seabed is added



#### MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER (INGLÉS).



to the validated model and shear stress is calculated in the seabed. Finally, results of the last model are interpreted and the need of protection is determined.

In the first analysis, turbulence intensity turned out to be the most important parameter to model the flow induced by a propeller using CFD, as it is complex to set it value and results are highly dependent on it. By looking for the best fit with experimental result, a value of 30% is set for the turbulence intensity. As experimental and model results are close enough, the model is considered validated.

In the second analysis, the main variables are related to the mesh settings next to the seabed which must be suitable for modelling the viscous layer next to it. The parameter that represents this is  $y^+$ , which value should be between 30 and 100. Refining the mesh adjacent to the wall with 30 layers and a shrink ratio of 1,16 an appropriate value of  $y^+$  is obtained, with a maximum of 49.

A coefficient that relates the velocity on the seabed (outside the viscous layer), efflux velocity, propeller diameter and distance between the shaft of the propeller and seabed is determined; its value is between 0,3 and 0,35 while in other methodologies varies from 0,2 to 0,44. This coefficient appears in almost every methodology, so this result links CFD with other alternatives.

Once the model is validated, shear stress in the seabed can be obtained. Then, the need of protection can be determined by using Shields's abacus for a granulometry. Shields's abacus can also be utilized to establish the particle size of the seabed protection. With post-processing software, the eroded area can be estimated for a specific particle size.

### Conclusions.

The following conclusions are drawn;

- The model proposed in this study is able to reproduce accurately the flow generated by a propeller in order to analyze the propeller induced scour.
- Turbulence intensity is the most important parameter for the hydrodynamics of the wake, as it is the main factor in momentum transfer from inside to outside the wake. Tangential and radial components of the velocity also contribute with this transfer, but to a lesser extent.
- An interval for the coefficient used in other methodologies, that relates velocity in the seabed, efflux velocity, diameter of the propeller and distance between shaft and seabed has been obtained.
- The second analysis, with seabed influence, allows for obtaining tangential stress in the seabed and other derived results like the area affected by scour or the particle size of the seabed protection.
- When modelling the seabed influence, it is important to refine the mesh appropriately to obtain accurate results.
- Computational Fluid Dynamics can handle the propeller induced scour problem by itself or be integrated in other methods by using the calculated coefficient.





## Bibliography.

- B.Phillips, A., R.Turnock, S., & Furlong, M. (2009). Evaluation of manoeuvering coefficients of a sefl-propelld ship using blada element momentum propeller model coupled to a Reynolds averaged Navier-Stokes flow solver. *Ocean Engineering*.
- Bakker, A. (2012). *The Colorful Fluid Mixing Gallery*. Retrieved from http://www.bakker.org/cfm.
- Blaaw., H., & Kaa, E. v. (1978). Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvering ships. *Delft Hydraulics Laboratory*.
- Chao-Tsung Hsiao, Jin-Keun Choi, Eric G. Paterson, Georges L.Chahine. (2007). Numerical and Experimental Study of a Horizontal Jet Below a Free Surface. *9th International Conference on Numerical Ship Hydrodinamics.*
- G.A. Hamill, H.T. Johnston, D.P. Stewart. (1999). Propeller Wash Scour Near Quay Walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.*
- Gobierno de España, Ministerio de Fomento. (2012). *Recomendaciones para Obras Marítimas* (*ROM*) Serie 2, Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre. Puertos del Estado.
- Jian-Hao Hong, Yee-Meng Chiew, M.ASCE, Nian-Sheng Cheng. (2013). Scour Caused by Propeller Jet. *Journal of Hydraulic Engineering.*
- N.Abbas, N.Kornev, I.Shevchuk, P.Anschau. . (2015). CFD prediction of unsteady forces on marine propellers caused by the wake nonuniformity and nonstationarity. *Ocean Engineering*.
- PIANC. (2015). Gudelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. Bruxelles, Belgique.
- Stephen R. Turnock, Alexander B. Phillips, Joe Banks, Rachel Nicholls-Lee. (2011). Modeling tidal curren turbine wakes using a coupled RANS-BEMT approach as a tool for analysing power captura of arrays of turbines. *Ocean Engineering*.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computationa Fluid Dynamics.* Essex: Pearson Education.
- Vesting, F. (2012). Implementation for lifting line propeller representation. *CFD with OpenSource software*.
- W.Lam, G.A.Hamild, Y.C. Song, D.J. Robinson, S.Raghunathan. (2011). A review of thaae equations used to predict the velocity distribution within a ship's prepeller jet. *Ocean Engineering*.