

Modelo Geométrico y Dinámico para Aparejos de Pesca de Arrastre

Dr. Ing. Jorge Freiria Pereira
Facultad de Ingeniería
CP 11300 Montevideo, Montevideo, Uruguay
Tel: (0598) 2711 3386
email: jfreiria@fing.edu.uy

Resumen

La empresa AcruxSoft ha desarrollado el nuevo simulador para redes de pesca de arrastre de fondo TrawlSim 3D. Éste permite determinar, para un aparejo de pesca y velocidad dados, la forma que el dispositivo se despliega estando en condiciones de captura, pudiendo prever si ese comportamiento es adecuado para la pesquería objetivo o si por el contrario es necesario realizar modificaciones que posibiliten llegar a una forma ideal. Permite además predecir la resistencia hidrodinámica del aparejo completo y su incidencia en el costo de la operación y dimensionamiento de los equipos y artes.

En su última versión el programa incorpora modelos matemáticos desarrollados por el Grupo de Investigación en Desarrollo Pesquero del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería. Se han adoptado modelos matemáticos para todos los elementos que componen el aparejo, tales como los cables de arrastre, los portones y la propia red. En el caso de ésta última, donde se concentra el 60% de la resistencia, el modelo establece una forma y resistencia inicial que luego se va ajustando en un proceso iterativo.

Los resultados obtenidos para la configuración del arte en condiciones de pesca son comparados con datos de sensores en pruebas de mar, pudiéndose establecer que las diferencias obtenidas se encuentran dentro del margen de incertidumbre de las medidas realizadas en aparejos en condiciones reales de pesca.

Abstract

AcruxSoft has developed a new simulator for trawl fishing gear, TrawlSim 3D. It allows to determine, for an specific fishing equipment and a given speed, the form that the device unfolds when it is in catching conditions, and is able to anticipate if that behavior is adapted to the objective fishing ground or if on the contrary it is necessary to introduce some modifications that make it possible to arrive to an ideal form. It allows, in addition, predict the hydrodynamic resistance of the complete equipment and its incidence in the cost of the operation and sizing of the equipment and arts.

In its last version the program incorporates mathematical models developed by the Fishing Investigation Group at the School of Engineering. Mathematical models for all the elements that compose the equipment have been adopted, such as cables, inner doors and the proper net, which concentrates over 60% of total drag.

The results obtained for some configuration of fishing gears are compared with data of sensors in tests at sea; differences between both data, sensor registers and model results, are within the margin of measurements uncertainty of actual fishing gears.

1. Introducción

1.1. Descripción de un sistema de pesca de arrastre

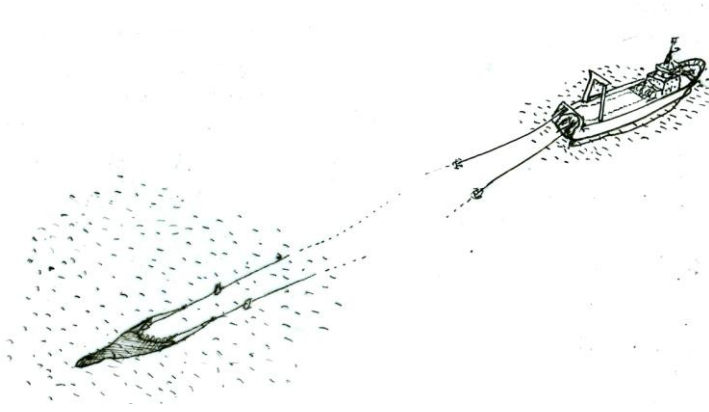


Fig. 1 – Representación de un sistema de arrastre típico

La pesca de arrastre (trawl fishing) consiste en el remolque de un aparejo de pesca de cierta complejidad, compuesto por numerosos elementos individuales, el cual termina configurándose como un dispositivo que filtra la masa de agua con el objetivo de capturar peces (Fig. 1).

El sistema completo está compuesto por un dispositivo de arrastre, el cual en general es un buque o una pareja de buques, que arrastra el aparejo de pesca.

Por su parte el aparejo está formado por cables de tracción, portones, cables de aparejamiento de la red, y la propia red con sus elementos estructurales (relingas), flotadores y lastres.

Cada uno de éstos está sujeto a solicitaciones hidrostáticas, hidrodinámicas y gravitatorias, y en algunos casos se agregan otras como la fricción en las zapatas de los portones con el lecho marino.

Estas solicitaciones generan esfuerzos en el aparejo, que por la naturaleza de los materiales que lo componen, resulta en deformaciones que permiten adoptar, en el estado de equilibrio para condiciones estacionarias, una configuración adecuada para el fin para el cual fue concebido.

1.2. El programa de simulación TRAWLSIM 3D

TrawlVision3D es un programa que permite simular un aparejo de pesca en condiciones de trabajo reales.

Trawl Vision Simulator, es una herramienta innovadora dirigida a la pesca de arrastre, cuya sólida funcionalidad permite: evaluar, corregir y optimizar los rendimientos, que influirán en el ahorro de costes económicos y aumento de la producción. Mediante el TVS podrá diagnosticar el comportamiento anticipado del sistema de arrastre, minimizando las acciones correctivas en el mar. (Chalkling, 2010)

Integra en su matriz todas los componentes de un aparejo de pesca de arrastre, permitiendo al usuario definir las características de cada uno de estos elementos de acuerdo al diseño definido por el armador, contando con una amplia base de datos que incluyen suministros normalizados o catálogos de los propios proveedores.

El operador también debe establecer las condiciones de pesca actuantes, es decir la velocidad y dirección de arrastre, a la vez que deberá identificar lo más fielmente posible las características de la zona, profundidad, corrientes, etc.

Con estos datos TrawlVision3D permite obtener en tiempo real imágenes con una muy alta definición tanto del despliegue del aparejo en el agua como del sistema completo incluyendo del buque.

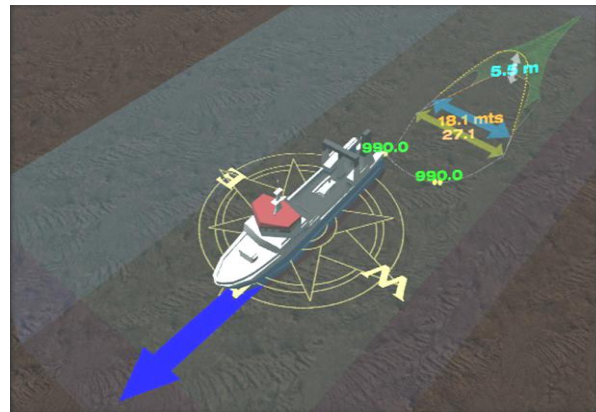


Fig. 2 – Imagen del sistema completo

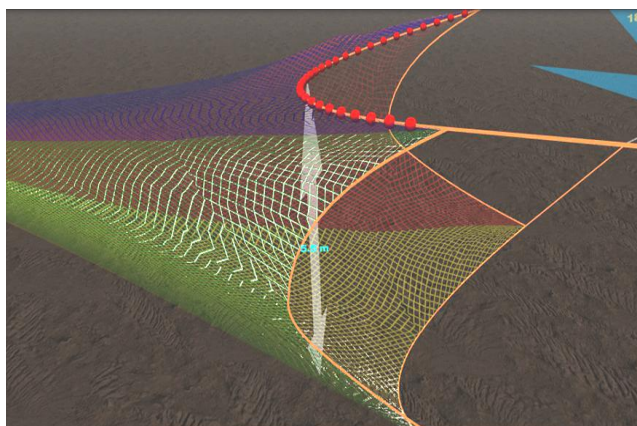


Fig. 3 – Imagen de la red desplegada con la indicación de la apertura vertical

Mediante cámaras virtuales se puede visualizar desde cualquier ángulo y aproximación la forma que adopta el sistema, con las indicaciones de las dimensiones que definen la configuración (Fig. 2).

El monitoreo de dichas dimensiones (Fig. 3) y su modificación para lograr el óptimo resultado para una pesquería específica se transforma en una

herramienta fundamental en la búsqueda de mejorar el rendimiento del sistema, en hacerlo más eficiente y a la vez colaborar en la preservación del recurso.

2. Descripción del aparejo de pesca

Los elementos componentes del aparejo de pesca completo son los siguientes:

2.1. Cable de arrastre

El cable de arrastre es el elemento que vincula el elemento de tracción ubicado sobre la cubierta del buque y el resto de los elementos que componen el aparejo. Se conecta por un extremo al guinche de arrastre y por el otro al portón, cuya fuerza de escape lateral (lift), al desplazarlo lateralmente, genera que su plano de desarrollo forme un ángulo α con la dirección de flujo o dirección de avance.

Consiste en un cable flexible confeccionado normalmente con hilos de acero trenzados sobre un alma de fibra textil, relativamente extenso, dependiendo de la profundidad de la zona de pesca.

2.2. Portones

Los portones son una pieza fundamental en el aparejo, generando una fuerza hidrodinámica lateral, normal a la dirección de avance, que produce una apertura horizontal en la boca de la red mediante la disposición de los cables correspondientes. Tienen formas diversas y a través de los años han ido transformando su forma de construcción, pasando de simples estructuras de madera a complejas secciones hidrodinámicas confeccionadas en acero laminado.

El principio de funcionamiento es el de la circulación de un fluido sobre una superficie finita donde se genera un diferencial de presión, y por lo tanto una fuerza neta en la dirección normal al flujo, merced a la falta de simetría del dispositivo en relación con las líneas de corriente, efecto logrado a partir de la configuración del sistema de enganche con los cables de arrastre (anterior) y bridas (posterior).

Existen además otras componentes de fuerza en el caso de las redes de fondo, las cuales están asociadas a la fricción que genera el desplazamiento del canto inferior del portón sobre el lecho marino.

2.3. Malletas o Patentes / Bridas

La conducción de la red a partir del extremo posterior del portón se realiza a través de un conjunto de cables, un primer tramo individual denominado malleta o patente, que se continúa, conectado mediante una pieza especial, con otro par de cables paralelos denominados bridas que sujetan respectivamente los extremos de las relingas superior e inferior de la red.

Estos cables trabajan prácticamente en un plano horizontal, formando un cierto ángulo con la dirección del flujo, ángulo que estará determinado por la acción de corrimiento lateral de los portones.

La tensión en los extremos de estos cables corresponderá a la cuota parte de la resistencia de la red y accesorios ubicados aguas arriba.

2.4. Red

La red tiene la función de filtrar el agua y peces pequeños (juveniles), manteniendo dentro los peces cuya talla corresponde a individuos adultos. Las mallas son diseñadas en tamaño para favorecer esta distinción entre tallas, acción que es denominada “selectividad” del arte.

La sección anterior cuya forma puede ser modelada como un cono truncado, dirige al pez hacia la parte posterior, cuya forma esencial es un cilindro y a la que se denomina túnel o copo. El extremo posterior del túnel es el espacio donde el pez es finalmente capturado.

La red propiamente dicha consiste en una estructura formada por paños o secciones tejidas de hilos trenzados formando mallas regulares de forma romboidal (Fig. 4).

Estas secciones son unidas entre sí, dimensionadas de tal manera que una vez sometido el conjunto al esfuerzo hidrodinámico e hidrostático terminen adoptando la configuración requerida; la forma que toma se asemeja a la superficie compuesta por un cono truncado añadido con un cilindro, el cual se encuentra cerrado en su extremo posterior.



Fig. 4 - Tejido de una red de polietileno

El extremo anterior del cono se sujeta firmemente a sendos cables que definen aspectos estructurales de la red y transmiten los esfuerzos hidrodinámicos a las malletas. Éstos se denominan relingas superior e inferior.

Para obtener la apertura de la base mayor del cono o boca de la red, se disponen sobre la relinga superior una serie de flotadores cuya misión es elevar dicho cable, mientras que en la relinga inferior se colocan lastres para lograr el efecto contrario; ese diferencial de fuerzas verticales junto con las fuerzas hidrodinámicas son los responsables de la apertura vertical.

3. Modelo matemático

El análisis y representación de sistemas físicos simples o complejos exige la determinación de modelos que puedan ser evaluados mediante procedimientos matemáticos. Estos modelos son una representación de la realidad; muestran en números el comportamiento del sistema afectado por condiciones ambientales y físicas particulares, y están desarrollados a partir de una o un conjunto de ecuaciones matemáticas.

El aparejo de pesca constituye un sistema físico complejo, afectado por condiciones relacionadas con el medio, temperatura, tipo de fondo y velocidad a la que es conducido por el buque. La respuesta del aparejo a estos factores es única y está representada por una configuración final de equilibrio.

Sin embargo, resulta difícil expresar esta respuesta a partir de un modelo matemático sencillo representado por un único algoritmo en el que eventualmente pudieran integrarse todas los parámetros y variables involucradas en el fenómeno, y que tuviera una universalidad que abarcara las infinitas modificaciones que pudieran ser introducidas en cada uno de los elementos componentes.

Por otro lado, los componentes individuales son susceptibles de una modelación matemática con mayor o menor grado de dificultad de acuerdo a su estructura, lo que permite, con una apropiada idealización del elemento, determinar su comportamiento en las condiciones de funcionamiento establecidas.

A partir de estas idealizaciones o modelos se puede predecir la configuración individual dada por su posición espacial y fuerzas intervinientes, integrando luego éstas con las

correspondientes a cada uno de los restantes componentes para determinar la configuración del conjunto.

Esta integración necesita de algunas hipótesis de trabajo, las cuales forman parte del modelo global:

- Se supone que las fuerzas y reacciones que actúan en cada elemento individual no afectan o son independientes del resto, manteniendo la continuidad a través de las solicitaciones en los elementos de vínculo entre ellos.
- Para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas se utiliza el modelo de Newton:

$$R = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \gamma \cdot S \cdot V^2 \quad (1)$$

Donde:

R es la fuerza hidrodinámica

C es el coeficiente de resistencia adimensionado

γ es el peso específico del fluido

S es la superficie proyectada según un plano normal a la dirección de flujo

V es la velocidad de flujo o velocidad relativa entre el fluido y el elemento móvil

- Se supone que existe simetría en la disposición del aparejo respecto a la dirección de flujo.

A continuación se describen los modelos adoptados para cada uno de los elementos componentes del aparejo de pesca de arrastre de fondo.

3.1. Red

Se definirán a continuación algunos conceptos y definiciones que son utilizadas en el desarrollo de las formulaciones del coeficiente de arrastre en referencia a las figuras 5 y 6:

- Lado de la malla: es la distancia entre dos nudos consecutivos sobre un filamento de diámetro d .
- Nudo: Unión de dos filamentos que componen la trama, se le asigna un diámetro equivalente d_k (esfera).
- Apertura de malla: se denomina así al ángulo que forman dos filamentos que se unen en un nudo, vistos en el sentido longitudinal, θ .
- Ángulo de ataque: es el ángulo que forma el plano de la malla con la dirección de flujo, α .
- Coeficiente de filtrado: es la relación entre el área proyectada de hilo que compone una malla y el área de la malla, S .

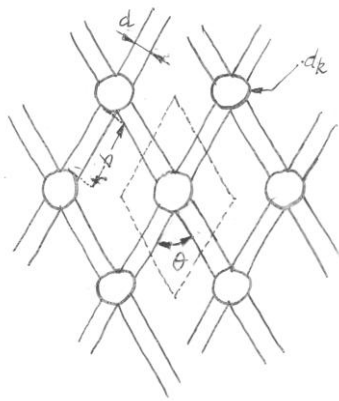


Fig. 5 - Idealización de elementos de la red

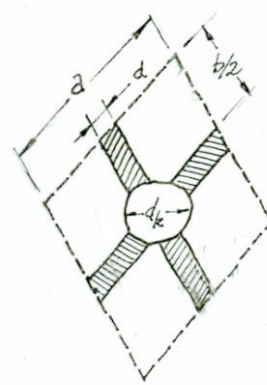


Fig. 6 - Elementos de una malla individual

El filtrado del agua a través de las mallas genera una componente de resistencia hidrodinámica sobre cada segmento de hilo que forma la malla (barra) y cada nudo que une estos segmentos.

El modelo a utilizar es denominado “seno cuadrado”; es presentado por Wileman y Hansen (Wileman & Hansen, 1988) e introduce una modificación en las expresiones del coeficiente de arrastre planteadas por Ferro y Hou (Ferro & Hou, 1984), estableciendo que éste es proporcional al $\text{seno}^2 \beta$ para una barra que representa un hilo de una malla de la red. Esta relación derivada de trabajos experimentales, sustituyendo la utilizada hasta entonces con respecto a $\text{seno}^3 \beta$, mejora las prestaciones del modelo:

- Mejor relación funcional entre el C_D y el ángulo de apertura θ
- Se corrige la dependencia con relación al ángulo de ataque α
- Se introduce un término para reducir la predicción del arrastre

La expresión de este coeficiente será evaluada en forma diferente para la zona anterior o cono de la red, y para la parte posterior o túnel.

3.1.1. Coeficiente de resistencia para la zona del cono

Coeficiente de arrastre para una barra

$$C_{D \text{ BARRA}} = C_{D \text{ CIL}} \cdot \text{seno}^2 \beta \cdot (1 + 0.5 \cdot \text{seno} \alpha) \cdot \left(1 - \frac{d_k}{a}\right) \quad (2)$$

Donde:

$C_{D \text{ CIL}}$ es el coeficiente de resistencia para un cilindro, con un valor sugerido de 1.1 (Ferro & Hou, 1984)

β es el ángulo que forma la barra en relación a la dirección del flujo
 α es el ángulo que forma la malla en relación a la dirección del flujo
 a es el lado de la malla
 d_k es el diámetro del nudo

Coefficiente de fricción para una barra

$$C_{f \text{ BARRA}} = m \cdot C_{D \text{ CIL}} \cdot (1 + 2 \cdot \text{seno } \beta - 3 \cdot \text{seno }^3 \beta) \cdot \left(1 - \frac{d_k}{a}\right) \quad (3)$$

Donde:

$m \cdot C_{D \text{ CIL}}$ es el coeficiente de fricción asociado de la superficie de las barras, con un valor sugerido de 0.0315 (Ferro & Hou, 1984)

Coefficiente de arrastre para un nudo

$$C_{D \text{ NUDO}} = C_{D \text{ ESF}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_k^2 \cdot \frac{l}{2 \cdot a \cdot d} \quad (4)$$

Donde:

$C_{D \text{ ESF}}$ es el coeficiente de arrastre para una esfera, con un valor de 0.47
 d es el diámetro del hilo o barra; se supone una relación dk/d entre 3.16 y 3.64

3.1.2. Coeficiente de resistencia para la zona del túnel

Las mallas en el túnel, a diferencia del cono, quedan dispuestas en la misma dirección que el flujo.

Coefficiente de arrastre para una barra

$$C_{D \text{ BARRA } 0} = C_{D \text{ CIL } 0} \cdot \text{seno }^3 \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \frac{d_k}{a}\right) \quad (5)$$

Donde:

$C_{D \text{ BARRA } 0}$ es el coeficiente de resistencia de las barras en el túnel
 $C_{D \text{ CIL } 0}$ es el coeficiente de resistencia para un cilindro, considerándose ahora un valor de 1.0

Coefficiente de fricción para una barra

$$C_{f \text{ BARRA } 0} = C_f \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \frac{d_k}{a}\right) \quad (6)$$

Donde:

C_f es el coeficiente de fricción de la superficie de las barras, con un valor sugerido de 0.07 (Ferro & Hou, 1984)

Efecto de apantallamiento (shadow)

Se incluye en este caso el efecto que produce sobre un hilo el inmediato anterior, en el entendido que ambos se encuentran alineados en la dirección del flujo, a través de un factor que afecta directamente el valor de la resistencia total:

$$C_{AP0} = \left(1 - C_s \left(\frac{d}{a \cdot \cos \frac{\theta}{2}} \right)^{1/2} \right)^2 \quad (7)$$

Donde:

C_s es un coeficiente experimental cuyo valor se puede considerar iguala a 1.0

3.1.3. Áreas de actuación

Los coeficientes detallados precedentemente, se aplican a la ecuación de Newton (ec. 1), en donde se debe indicar además el área de actuación del fluido. Los mismos están definidos en función de un área unitaria de malla, por lo cual simplemente resta multiplicarlos por el número de barras y nudos según corresponda, para cada una de las secciones consideradas.

3.2. Flotadores

Existen diversos tipos de flotadores. Sin embargo, en la actualidad, aquellos confeccionados en materiales plásticos tienen un uso extendido. La forma adoptada mayoritariamente es la esférica, con distintos espesores del material de acuerdo a las profundidades y presiones que deben soportar.

Su resistencia hidrodinámica se calcula

mediante la formulación de Newton, considerando el área proyectada de la esfera, la circunferencia diametral y un coeficiente de arrastre que se extrae de la gráfica que muestra su comportamiento en función del Número de Reynolds (Re) asociado (fig. 7).

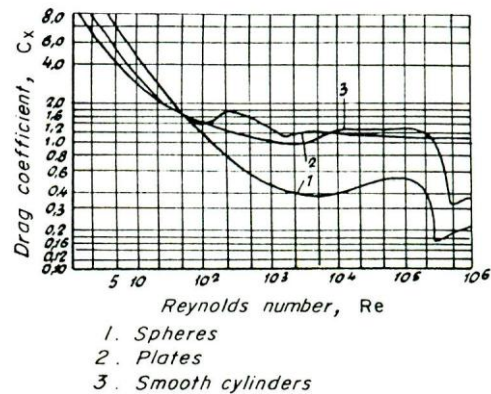


Fig. 7 - Coeficiente de Arrastre en función del Re
(Fridman A. L., 1969)

Para las velocidades normales desarrolladas en operaciones de pesca y las dimensiones de los flotadores utilizados, los valores de Re oscilan en el entorno de $5 \cdot 10^5$, por lo cual se establece en la literatura que el coeficiente de arrastre puede estimarse en 0.47.

$$R_{FLOT} = \frac{1}{2} \cdot C_{DESF} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (8)$$

Donde:

C_{DESF} es un coeficiente experimental cuyo valor se estima en 0.47

Por su parte también se debe considerar la fuerza vertical representada por la flotación neta, calculada como la diferencia entre la flotación absoluta y el peso de la unidad.

3.3. Lastres

El arrastre de elementos del aparejo sobre el lecho marino, como el caso de los lastres, genera esfuerzos derivados de la fricción que aparece en la interfase. Esta fuerza depende del peso del elemento móvil, de la superficie de actuación o fricción, del tipo de suelo y del tipo de movimiento relativo (deslizamiento, rodadura).

El diagrama de fuerzas de un elemento sometido a esfuerzos de fricción es el descrito en la fig. 8, cuya expresión algebraica está dada por el siguiente sistema de ecuaciones:

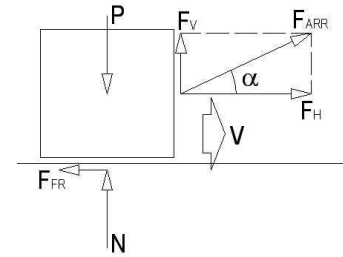


Fig. 8 - Diagrama de Fuerzas durante el deslizamiento

$$F_{FR} - F_H = F_{FR} - F_{ARR} \cdot \cos \alpha = 0 \quad (9)$$

$$N + F_V - P = N + F_{ARR} \cdot \sin \alpha - P = 0 \quad (10)$$

$$F_{FR} = f \cdot N \quad (11)$$

Donde

F_{FR} es la fuerza de fricción

F_{ARR} es la fuerza externa actuante sobre el elemento, con sus componentes F_H y F_V

N es la reacción en la superficie de contacto

P es el peso del elemento

f es el coeficiente de fricción entre el elemento y la superficie de contacto

El proceso de fricción tiene dos regímenes de funcionamiento; mientras la fuerza de actuación no logra mover el cuerpo, el sistema se encuentra en equilibrio y el factor de fricción se define como estático, f_s ; una vez que se vence esta resistencia al movimiento, es decir cuando la fuerza de acción es mayor que la fuerza de fricción, se establece un

régimen asociado a un factor de fricción de menor valor que el anterior, denominado factor de fricción dinámico, f_d . Una alternativa para definir f_s sería determinar experimentalmente la fuerza de acción necesaria para movilizar un peso conocido, variando los materiales de los cuerpos y la superficie de contacto.

Algunos valores de f son dados a continuación en la Tabla 1, entendiéndose que dichos valores corresponden al coeficiente de fricción estático:

Tabla 1 – Coeficientes de fricción según tipo de material y superficie de deslizamiento

Material	Arena y piedra	Arena fina
Hierro	0.47	0.61
Madera	0.51	0.73
Piedra (granito)	0.54	0.70
Plomo	0.44	0.53
Arena (en bolsas)	0.63	0.76
Cuerdas (fibras vegetales)	0.70	0.80

(Fridman A. L., 1969)

3.4. Relingas

El esfuerzo hidrodinámico y de otra naturaleza sobre el conjunto de red, flotadores y lastre se transmite al sistema de tracción a través de dos cables de acero que ocupan una función estructural, denominados relingas superior e inferior.

Existe un esfuerzo hidrodinámico sobre el propio cable, que se adiciona al esfuerzo sobre el resto de la red. Las forma de las relingas termina siendo definida por las numerosas solicitaciones a las que están sometidas: tensión en los extremos, representativa del arrastre del buque; tensión de la red distribuida en toda su longitud; tensión de flotadores en un caso y lastres en otro.

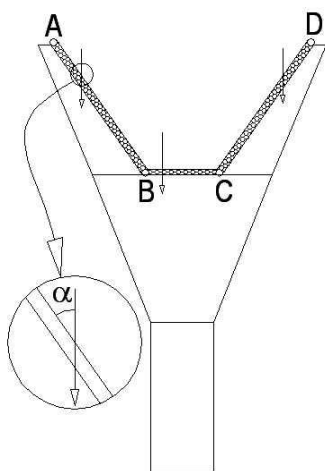


Fig. 9 - Representación plana de relinga

La catenaria formada debe ser determinada con precisión para aplicar los coeficientes de arrastre punto a punto e integrarlos en la dirección longitudinal. Sin embargo, en esta fase del modelo se ha considerado la relinga desplegada en un único plano, considerando distintos tramos lineales sometidos a los esfuerzos hidrodinámicos, utilizando como representación del cable la de un cilindro infinito (Fig. 9).

Cada uno de estos tramos es considerado individualmente con el correspondiente ángulo de acción en relación con el flujo incidente. Esta correspondencia es necesaria tener en cuenta a

los efectos del cálculo dado que el coeficiente de resistencia depende funcionalmente de dicha magnitud.

En estas hipótesis, la resistencia hidrodinámica es la suma de componentes representada por la siguiente expresión:

$$R_{RELINGA} = \sum_i \left(\frac{l}{2} \cdot C_{D\ CIL}(\alpha_i) \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \right) \quad (12)$$

Donde:

$C_{D\ CIL}$ es el coeficiente de resistencia para un cilindro en función del ángulo de incidencia del flujo cuya relación está definida en la Tabla 2.

α_i es el ángulo que forman los tramos de relinga en el plano de la red

Tabla 2 – Coeficientes de resistencia para un cilindro en función del ángulo de incidencia del flujo

α	$C_{D\ CIL}$	α	$C_{D\ CIL}$
0	0.12	50	0.70
10	0.20	60	0.90
20	0.32	70	1.12
30	0.41	80	1.25
40	0.56	90	1.3

(Fridman A. L., 1969)

3.5. Bridas y Malletas

La fuerza hidrodinámica sobre estos cables es calculada asumiendo la hipótesis que los

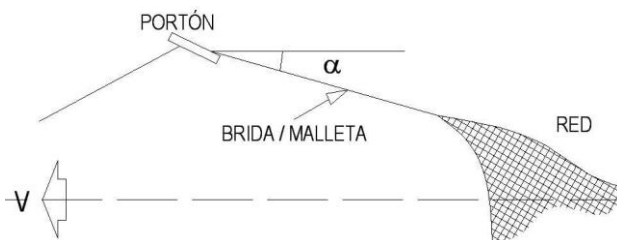


Fig. 10 - Ángulo de Bridas y Malletas en relación a la dirección de flujo

mismos forman una línea recta durante las operaciones de pesca. Si bien la representación real debería incluir una pequeña catenaria, el efecto en este caso se considera residual en relación con el valor total.

La tensión en sus extremos corresponden a la mitad de la resistencia total de la red y accesorios ubicados aguas arriba, la cual se transmite a los portones.

El cálculo en este caso se puede reducir al de un cilindro de dimensiones conocidas, el cual forma un determinado ángulo α con el flujo incidente. El ángulo de incidencia se deduce a partir de las condiciones iniciales que impone el modelo y luego a partir de las sucesivas iteraciones hasta llegar a la condición de régimen.

La tensión en sus extremos

$$R_{BRIDAS / MALLELAS} = \sum_i \left(\frac{l}{2} \cdot C_{D\ CIL}(\alpha) \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \right) \quad (13)$$

Donde:

$C_{D\ CIL}$ es el coeficiente de resistencia para un cilindro en función del ángulo de incidencia (Tabla 2)

α es el ángulo que forma la brida o mallela con el flujo incidente

3.6. Portones

El portón es un elemento que se encuentra insertado en la línea del cable que vincula el buque y la red, y cuya función es generar una fuerza lateral que permita expandir la distancia entre ambos cables de arrastre y permitir la apertura transversal de la boca del arte. Consiste en una estructura vertical que genera una fuerza de sustentación (normal a la dirección del flujo) que es la responsable por esa expansión lateral mencionada, además de una resistencia al arrastre, como el resto de los elementos del aparejo.

Las fuerzas de arrastre y sustentación tienen directa vinculación con las formas de estos dispositivos. Los más elementales y primitivos consisten en placas planas, con una relación sustentación/arrastre muy baja, tasas que han sido mejoradas a través de los actuales diseños hidrodinámicos. Los valores de estas fuerzas se calculan utilizando los coeficientes suministrados por los fabricantes.

$$R_{PORTÓN} = \frac{l}{2} \cdot C_{D\ PORTÓN} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (14)$$

$$S_{PORTÓN} = \frac{l}{2} \cdot C_{L\ PORTÓN} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (15)$$

Donde:

$C_{D\ PORTÓN}$ y $C_{L\ PORTÓN}$ con los coeficientes de arrastre y sustentación (según fabricante)

Los portones, al igual que los lastres que se sujetan en la relinga inferior, trabajan arrastrándose a través del fondo marino, por lo cual existe una componente de fricción que debe adicionarse a las resistencias calculadas. Dicha componente, relativamente menor en términos comparativos con los valores de resistencia del portón, es calculada utilizando datos de fricción establecidos en la Tabla 1 vistos anteriormente.

3.7. Cables de arrastre

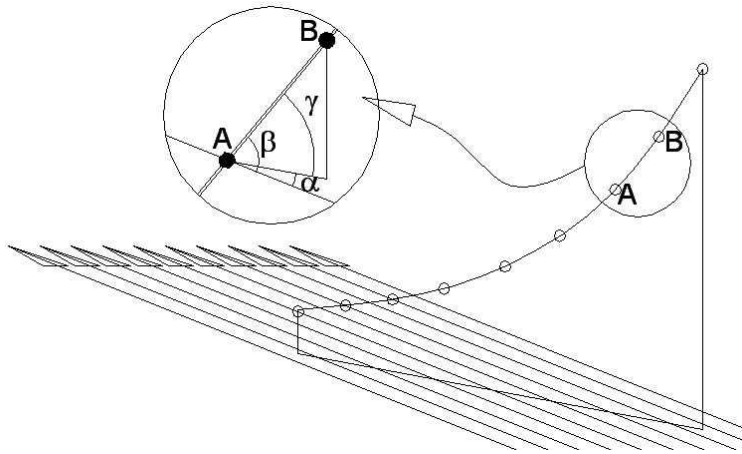


Fig. 11 - Posición relativa del cable de arrastre

La línea de arrastre consiste en un cable muy extenso con una catenaria muy marcada dependiendo de las dimensiones y peso propios, del largo y la profundidad del lugar. El plano vertical que contiene esta catenaria forma un ángulo de trabajo en relación con la dirección del flujo.

En este caso no es posible considerar este elemento como un cable extendido en forma rectilínea como fue realizado con las bridas y malletas. Fue considerado a los efectos de su cálculo para el programa, una división en tramos lineales de manera de aproximar la forma a una poligonal, donde cada uno de los segmentos considerado individualmente es sometido al flujo definido por el ángulo espacial relativo β , definido por la siguiente expresión:

$$\text{seno } \beta = (1 - \cos^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha)^{1/2} \quad (16)$$

Donde:

- α es el ángulo de incidencia que forma el flujo y el plano de la catenaria
- β es el ángulo de incidencia que forma el flujo y un tramo de la catenaria
- γ es el ángulo de proyección horizontal dentro del plano de la catenaria

Una vez definido el ángulo β se calcula el coeficiente de arrastre para esa barra utilizando la relación de coeficientes de arrastres para una barra en función del ángulo (tabla 2).

3.8. Condiciones iniciales

La principal dificultad en la implementación de un modelo es la selección de un conjunto de condiciones iniciales con las cuales se logre establecer una primera configuración espacial del aparejo, y sobre la cual se puedan aplicar los modelos matemáticos de los elementos individuales para luego integrarlos en el conjunto; a partir de esta primera

configuración y a través de aproximaciones sucesivas se puede establecer una condición geométrica y dinámica de equilibrio.

Los trabajos realizados por Nomura y Yamazaki (Nomura & Yamazaki, 1975) permiten realizar esta aproximación a partir de la formulación experimental para la resistencia de redes de arrastre cuya expresión en N es la siguiente:

$$R_{RED} = 8 \cdot g \cdot L_m \cdot L_n \cdot \left(\frac{D_t}{m_s} \right) \cdot V^2 \quad (17)$$

Donde:

- R_{RED} , resistencia al arrastre de la red (N)
- L_m , perímetro extendido de la boca de la red (m)
- L_n , largo de la red extendida (m)
- D_t , diámetro medio del hilo (mm)
- m_s , longitud de malla media (mm)
- V , velocidad (m/s)
- g , aceleración de la gravedad (m/s^2)

A partir de este valor inicial correspondiente a la resistencia de la red con su aparejo, sin incluir la resistencia de los portones, se determina la primer configuración espacial del sistema a partir de las relaciones geométrico – dinámicas presentadas por Fridman (Fridman, 1986), definida por las aperturas vertical y horizontal de la boca de la red, y la apertura de portones.

3.9. Trabajo del modelo

Una vez definida la primera configuración espacial del aparejo, se calculan para cada uno de los elementos individuales componentes, las fuerzas hidrodinámicas y de otra naturaleza que actúan sobre éstos, aplicando las expresiones desarrolladas anteriormente y que constituyen el núcleo central del modelo matemático. Se incluyen ahora las fuerzas desarrolladas por los portones de arrastre, que no son consideradas en el cálculo según la formulación de Nomura.

Con las distintas componentes de fuerzas resultantes de la aplicación de los distintos algoritmos calculadas, se vuelve a definir la configuración del aparejo, la cual presentará variantes respecto a la configuración inicial en la medida que el valor de las fuerzas toma otro valor que el inicial.

Se visualiza entonces en estos primeros pasos la filosofía del modelo, que representa en forma discreta un proceso que en la naturaleza transcurre en forma continua, la interacción

entre el conjunto de fuerzas aplicadas a un sistema complejo flexible, y la configuración espacial de éste a partir de las tensiones internas.

El proceso de cálculo en forma alternativa e interactiva entre fuerzas y configuración geométrica refleja la realidad física de este tipo de sistema. Se incluye un mecanismo para dar por finalizada la etapa de cálculo habiendo alcanzado las condiciones de equilibrio dinámico, consistente en establecer una diferencia entre los valores obtenidos en dos pasos consecutivos cuya diferencia se transforme en un valor marginal preestablecido como un porcentaje del total calculado.

La convergencia es una condición fundamental para la viabilidad del modelo; en todos los campos definidos ésta se logra de una forma muy rápida. En la figura 12 se muestra el comportamiento de la

variable R_N (Resistencia de la Red).

Esto potencia la aplicación en dos sentidos: por un lado la rapidez de respuesta ante variaciones introducidas, y por otro la robustez del código.

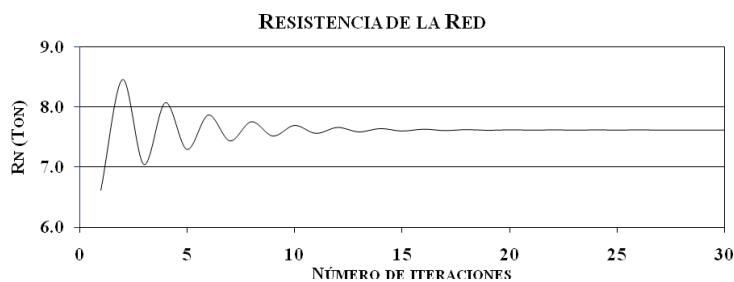


Fig. 12 - Convergencia en el Cálculo de Resistencia de la Red

4. Resultados

Luego de finalizada la etapa de armado de la estructura lógica e introducción de los algoritmos que representan cada uno de los elementos del modelo, se realizó el testeo del mismo para visualizar su convergencia, aspecto mencionado anteriormente, y verificar la alineación de los resultados obtenidos con datos comparativos que contaran con un alto nivel de confianza por parte de los operadores.

Los datos con los que se contaron para la realización de la validación fueron suministrados por personal competente directamente involucrados en la determinación de las medidas mediante sondas ultrasónicas, por lo cual son considerados datos validos a los efectos de la presente revisión.

Las redes utilizadas en el ejercicio de comparación tienen las características generales que se indican a continuación, estableciéndose en las Tablas 3 a 4 los valores comparativos correspondientes.

1 – Identificación: HVT 536

Características: Relinga superior, 51.0 m; Relinga inferior, 60.0 m; Malleta, 205.0 m; Bridas superior e inferior, 50.0 m cada una; Cable de remolque, 540.0 m; Flotadores, 90 unidades; Lastre, 2559 Kg (en agua); Área de portones, 5.0 m² cada uno; Longitud del cuerpo, 51.0 m.

Tabla 3 – Valores comparativos sensor / simulador para la red HVT 536

Magnitud	Sensores	TrawlSim 3d
Velocidad (Nudos)	4.0	4.0
Resistencia Red (Kg)	-	6981
Resistencia Portones (Kg)	-	2347
Altura de Boca (m)	2.80	2.75
Distancia entre Portones (m)	160	164
Apertura de Alas (m)	-	32.2

2 – Identificación: HVT 630

Características: Relinga superior, 61.0 m; Relinga inferior, 66.5 m; Malleta, 320.0 m; Bridas superior e inferior, 50.0 m cada una; Pie de gallo, 3.0 m; Cable de remolque, 540.0 m; Flotadores, 105 unidades; Lastre, 2559 Kg (en agua); Área de portones, 7.5 m² cada uno; Longitud del cuerpo, 63.0 m.

Tabla 4 – Valores comparativos sensor / simulador para la red HVT 630

Magnitud	Sensores	TrawlSim 3d
Velocidad (Nudos)	4.0	4.0
Resistencia Red (Kg)	-	8573
Resistencia Portones (Kg)	-	3520
Altura de Boca (m)	3.30	2.85
Distancia entre Portones (m)	218	228
Apertura de Alas (m)	-	37.6

3 – PescaPuerta

Características: Relinga superior, 78.0 m; Relinga inferior, 100.0 m; Malleta, 265.0 m; Bridas superior e inferior, 30.0 m cada una; Pie de gallo, 2.8 m; Cable de remolque, 960.0 m; Flotadores, 60 unidades; Lastre, 12933 Kg (en agua); Área de portones, 6.2 m² cada uno; Longitud del cuerpo, 66.4 m.

Tabla 5 – Valores comparativos sensor / simulador para la red PescaPuerta

Magnitud	Sensores	TrawlSim 3d
Velocidad (Nudos)	4.4	4.4
Resistencia Red (Kg)	-	13771
Resistencia Portones (Kg)	-	3510
Altura de Boca (m)	4.80	3.91

Distancia entre Portones (m)	187	181
Apertura de Alas (m)	-	46.3

5. Conclusiones

El desarrollo de esta herramienta de cálculo introduce una mejora sustancial en la estimación de la resistencia del aparejo al considerar el conjunto de fuerzas actuando sobre una estructura flexible dispuesta en el espacio. Se considera para ello la forma que dicha estructura desarrolla hasta alcanzar un estado de equilibrio al ser sometida a un sistema dinámico que a su vez es dependiente de dicha configuración espacial.

Por su parte, la resistencia de la propia red es calculada considerando las dimensiones constructivas locales, teniendo en cuenta para cada zona el número y tamaño de malla y el diámetro del hilo.

El resumen de datos comparativos muestra que en el cálculo de la distancia entre portones, los resultados del modelo tienen diferencias entre un 2.5 y un 4.5 % con los datos suministrados por los armadores, estando las mayores diferencias representadas en la apertura vertical de la boca, con un rango entre 2.0 y 20.4 %.

Se ha identificado que es necesario avanzar en el comportamiento y posicionamiento espacial de los cables que conforman las bridas, cuyo estado final condiciona severamente la estimación de la apertura vertical, parámetro fundamental en la eficiencia para una pesquería tipo.

La introducción de mejoras en la identificación de los coeficientes de apertura de malla y en el ajuste de sus tamaños y diámetro de hilo a nivel localizado permitirá una refinación en el cálculo de la resistencia de la red, cuyo aporte a la resistencia global del aparejo es determinante en el valor final.

6. Bibliografía

- Chalkling, F. (2010). *Manual del Usuario*. Montevideo, Uruguay: ACRUXSOFT.
- Dickson, W. (1980). *Trawl drag area netting*. Bergen, Noruega, Noruega: Research, The Institute of Fishery Technology.

Ferro, R. S., & Hou, E. H. (1984). *A selected review of hydrodynamic force coefficient data on stranded wires used in fishing gears*. Scottish Fisheries Research, Aberdeen.

Fridman, A. (1986). *Calculations for fishing gear designs* (Vol. 1). (FAO, Ed.) Farnham, Surrey, Inglaterra: Fishing News Books Ltd.

Fridman, A. L. (1969). *Theory and design of commercial fishing gear*. Moscú: Pischevaya Promyshlennost.

Nomura, M., & Yamazaki, T. (1975). *Fishing Techniques*. Tokio: Japan International Cooperation.

Wileman, D. A., & Hansen, K. (1988). *Estimation of the drag of trawls of known geometry*. Hirtshals, Dinamarca: Danish Fisheries Technology Institute.