

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FUERZA DE ARRASTRE NORMAL Y
TANGENCIAL QUE PERCIBEN REDES DE NYLON LIMPIAS Y CON PRESENCIA
DE FOULING EN LOS CANALES AUSTRALES DE LA REGIÓN DE AYSÉN**

KEVIN VIDAL B.¹
ALDO TAMBURRINO T.²
YARKO NIÑO C.³
GUSTAVO ESTAY A.⁴
ALDO MUÑOZ S.⁵
JUAN BELTRÁN M.⁶
LUIS ZAMORANO R.⁷

RESUMEN

Esta investigación experimental presenta resultados de la fuerza de arrastre que perciben redes de nylon, utilizadas en los centros de cultivos de peces que operan en los canales australes de la región de Aysén. Los experimentos realizados simulan condiciones de operación real de un centro, por medio del uso de redes limpias y sucias debido a la presencia de *fouling*, organismos marinos que se adhieren a las redes debido a su exposición con el océano. La fuerza de arrastre sobre las redes se mide para 6 velocidades de ensayo entre 0.3 a 2.5 m/s, que es un rango que abarca condiciones de marea frecuentes y extremas en los canales de la región. Para cada red, se determina la fuerza de arrastre para el caso normal y tangencial, vale decir, cuando la velocidad de acercamiento de la corriente a la red es perpendicular y paralela, respectivamente. Ambas fuerzas representan solicitaciones reales sobre los centros de cultivo. Finalmente, los resultados experimentales, se presentan en función del coeficiente de arrastre, que es un parámetro que condensa las interacciones flujo-red y las características de la red.

¹Ingeniero Hidráulico, actualmente en Golder Associates – kvidal@golder.cl

²Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil and Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile – atamburr@ing.uchile.cl

³Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil and Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile – ynino@ing.uchile.cl

⁴Ingeniero de Proyectos, Instituto Nacional de Hidráulica – gustavoestay@inh.cl

⁵Ingeniero Hidráulico, actualmente en Golder Associates – amunoz@golder.cl

⁶Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – jbeltran@ing.uchile.cl

⁷Jefe de Investigación, Innovación y Desarrollo, Instituto Nacional de Hidráulica – luiszamorano@inh.cl

1. INTRODUCCIÓN

La cría de peces en la industria acuícola comúnmente se realiza por medio de jaulas. Estas son estructuras constituidas por un marco boyante que, a flote en el mar, sostiene una celda conformada por redes en cuyo interior se acoge y confina la especie a cultivar. La exposición de las redes a las corrientes marinas genera sollicitaciones sobre la estructura, así como sobre los elementos de anclaje que se utilicen para otorgarle estabilidad estructural. Así también, el flujo sollicita a las redes, lo que influye en su desgaste e incrementa la posibilidad de escape de los peces, cuyos efectos pueden ser nocivos e irremediables en el ecosistema. El alto impacto que esto representa, en términos de costos económicos y riesgos ambientales, ha motivado un gran número de investigaciones de modelación numérica y trabajo experimental, con el fin de caracterizar la fuerza hidrodinámica que se genera debido a la interacción del flujo con las redes (Le Bris and Marichal, 1998; Zhan et al., 2006; Swift et al., 2006; Tsukrov et al., 2011; Gansel et al., 2014,2015; Zhou et al., 2015, Tang et al., 2018).

La sollicitación hidrodinámica del flujo sobre las redes está dada por la fuerza de arrastre, y usualmente se caracteriza en términos del coeficiente de arrastre, que es un parámetro que resume las características de las redes y las interacciones flujo-red. Desde la perspectiva del trabajo experimental, el problema se acota a medir la fuerza de arrastre para una condición de flujo dada, metodología que permite calcular el coeficiente de arrastre de la red. (Le Bris and Marichal, 1998; Zhan et al., 2006; Swift et al., 2006; Tsukrov et al., 2011; Gansel et al., 2014,2015; Zhou et al., 2015, Tang et al., 2018).

Por otra parte, durante la operación de un centro de cultivo, la exposición prolongada de las redes a las aguas marinas hace que, sobre su superficie se adhieran algas y otros tipos de organismos. Estas especies se conocen como *fouling* y su presencia incurre en grandes problemas para la operación de los centros, pues, incrementan el área expuesta de las redes, lo que induce un incremento en la fuerza de arrastre que resisten (Swift et al, 2006; Gansel et al., 2014, 2015).

En Chile, la cría de peces se lleva a cabo predominantemente en la Región de Aysén, dado que su ecosistema alberga condiciones idóneas para el cultivo de especies de alta demanda en el mercado. Los centros de cultivo operan a mar abierto, y mayoritariamente se localizan en los canales australes de la región. Al interior de los canales, las corrientes sollicitan a los centros con velocidades que oscilan entre 0.3 y 2.5 m/s (Fierro et al., 1999; Salinas & Hormazábal, 2004), dependiendo de las condiciones climáticas y de marea que existan.

En esta investigación se propone un montaje experimental que permite realizar mediciones de la fuerza de arrastre que se ejercen sobre redes planas para distintas condiciones de flujo, con el fin de obtener el valor del coeficiente de arrastre de las redes. Los experimentos contemplan el uso de dos tipos de redes diferentes usadas en la operación de un centro de cultivo: la red pecera, que es la responsable de enclaustrar a los peces, y la red lobera, que protege la jaula pecera de depredadores naturales, como los lobos marinos. El objetivo del trabajo experimental es determinar el coeficiente de arrastre de estas dos redes, para la situación limpia y para condiciones de operación real, que se presentan por medio de la presencia de *fouling* sobre las redes. En adición

a lo anterior, se propone determinar el coeficiente de arrastre sobre un sistema compuesto por dos redes loberas, que simulan a la configuración que existe en un centro de cultivo durante un proceso de limpieza de la jaula. Como se indicó antes, el fouling adherido sobre la red incrementa la sollicitación que resiste y, en condiciones operacionales, su presencia se controla mediante cambios periódicos de las redes sucias por redes limpias. Las condiciones de flujo de este trabajo corresponden a 6 velocidades diferentes en un rango entre 0.3 a 2.5 m/s, de manera de caracterizar las velocidades de las corrientes de los canales australes de la región de Aysén para condiciones normales (Fierro et al., 1999) y condiciones extremas (Salinas & Hormazábal, 2004), que son las responsables de solicitar a las redes que componen los centros de cultivo.

Los experimentos realizados consideran dos casos: la determinación de la fuerza de arrastre normal y la fuerza de arrastre tangencial, que son dos tipos de sollicitaciones diferentes a las que se encuentran expuestas los centros de cultivo durante su exposición a mar abierto, resultado que se traduce en un valor característico del coeficiente de arrastre para redes limpias y con fouling.

2. MARCO CONCEPTUAL

El trabajo experimental para determinar el coeficiente de arrastre sobre redes planas usualmente se enfoca en medir la fuerza de arrastre F_D que perciben las redes debido a la exposición a un flujo (Le Bris and Marichal, 1998; Zhan et al., 2006; Swift et al., 2006; Tsukrov et al., 2011; Gansel et al., 2014,2015; Zhou et al., 2015). Esta fuerza se describe a partir de la ecuación de Morison para cilindros:

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

donde la fuerza de arrastre en la dirección del flujo, F_D , es función de: la densidad del fluido ρ , el área normal proyectada A , la velocidad del flujo V y el coeficiente de arrastre C_D . Una vez que se conocen estos parámetros, el coeficiente de arrastre se determina a partir de:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A V^2} \quad (2)$$

Este coeficiente es una función de las características del flujo en torno a las redes, del tipo de red que se utilice y de la orientación de la red respecto a la velocidad de acercamiento del flujo.

Las características del flujo se representan a partir del número de Reynolds

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (3)$$

donde V es la velocidad de aproximación del flujo a la red, ν es la viscosidad cinemática del fluido y d es una longitud característica del problema. Para este caso, comúnmente se usa el diámetro del hilo de la red.

Las redes son una composición del tipo malla confeccionada a partir de varios elementos de fibra cilíndrica. Éstas varían según el diámetro del hilo, la orientación de la grilla definida por sus hilos, la presencia o ausencia de nudos y el material con que se fabrican. Las características de las redes se describen a partir del índice de solidez (o solidez) S_n (Le Bris and Marichal, 1998; Zhan et al., 2006; Swift et al., 2006; Tsukrov et al., 2011; Gansel et al., 2014,2015; Zhou et al., 2015, Tang et al., 2017). Este se define como la razón entre el área efectiva que ocupa el conjunto de hilos y nudos (si es que existen) y el área total cubierta por la red, es decir:

$$S_n = \frac{A_{eff}}{A_{out}} \quad (4)$$

donde A_{out} es el área total proyectada de la región que es ocupada por la red y A_{eff} es el área efectiva que ocupa la red respecto del total.

Por otra parte, la presencia de fouling sobre una red se entiende como un aumento en el área expuesta de la red al flujo, lo que se interpreta como un crecimiento del índice de solidez y de la fuerza de arrastre (Swift et al., 2006; Gansel at al., 2014, 2015). Asimismo, la presencia de una segunda red también se interpreta como un crecimiento de la solidez de la red. Generalmente, el comportamiento hidrodinámico de las redes limpias y con fouling se describen a partir de la solidez (Zhan et al., 2006, Tsukrov et al., 2011, Swift et al., 2006; Gansel at al., 2014, 2015; Tang et al., 2017), y su efecto en el coeficiente de arrastre se aprecia directa o indirectamente en términos del área característica A que se emplea para la resolución de la ecuación (2). En este estudio se optó por utilizar el área total proyectada de la región que es ocupada por la red A_{out} como área característica y, en consecuencia, el coeficiente de arrastre se calcula a partir de:

$$C_D(Re, S_n) = \frac{2F_D}{\rho A_{out} V^2} \quad (5)$$

donde la ecuación (5) es una relación que depende de la solidez S_n y del número de Reynolds Re . La relación (5) es un enfoque de cálculo que ha sido utilizado en otros estudios que determinan el coeficiente de arrastre sobre redes con fouling (Swift et al., 2006; Gansel at al., 2014), y que permite visualizar con mayor claridad el efecto que tiene el índice de solidez en el valor del coeficiente de arrastre.

Otro factor relevante en el cálculo del coeficiente de las redes corresponde al ángulo de ataque del flujo respecto a la red ϕ . Si la velocidad del flujo es perpendicular, el ángulo de ataque es de 90° y la fuerza de arrastre incide normalmente sobre la red. En este caso, el valor del coeficiente de arrastre dado por la ecuación (5) se denota por $C_{D_{90}}$ y corresponde al coeficiente de arrastre normal de la red. Si la velocidad del flujo es paralela, el ángulo asociado es de 0° y el valor del coeficiente de arrastre se denota por C_{D_0} , que corresponde al coeficiente de arrastre tangencial de la red. Estudios sobre redes planas reportan que la fuerza de arrastre tangencial es de alrededor del 30% de la fuerza de arrastre normal y, en general, la fuerza de arrastre sobre la red se reduce a medida que lo hace el ángulo de ataque (Le Bris and Marichal, 1998; Zhan et al., 2006; Madsen et al., 2011; Gansel et al., 2014; Tang et al., 2018).

Desde la perspectiva del trabajo experimental, el conjunto de estos parámetros entrega una vía práctica para determinar el coeficiente de arrastre de las redes, sin embargo, otros estudios sugieren la necesidad de incorporar estudios de la hidrodinámica del flujo (Tsukrov et al., 2011; Gansel et al., 2014; Tang et al., 2017), ya que, factores como la interacciones entre los hilos de las redes o perturbaciones locales en la red debido a la presencia de fouling, pueden alterar el coeficiente de arrastre, y son variables que no aborda apropiadamente el índice de solidez.

3. TRABAJO EXPERIMENTAL

Montaje Experimental y Materiales

Los experimentos para medir la fuerza de arrastre hidrodinámica sobre redes limpias y con fouling se llevaron a cabo en el Canal de Calibración de Flujómetros del Instituto Nacional de Hidráulica. La instalación cuenta con un estanque de 75 m de longitud y una sección transversal de 1.5 m × 1.5 m sobre el cual se dispone un carro (Figura 1.a), que puede desplazarse a velocidad constante en un rango de 0.05 a 3.5 m/s por sobre el canal. En la parte trasera del carro se ubica un marco de acero inoxidable tipo raqueta, que se sumerge completamente al centro del estanque y que sujeta las redes a estudiar (Figura 1.b). El movimiento solidario del carro y la estructura recrea las sollicitaciones hidrodinámicas del flujo sobre las redes (Figura 1.d). En cada uno de los vértices del marco se ubica una celda de carga modelo AK12 marca Scaime de 12 kg de capacidad. Las celdas de carga son las responsables de sostener las redes y de registrar la fuerza de arrastre que el flujo ejerce sobre ellas (Figura 1.c). La fuerza que sienten las celdas de carga debido a la sollicitación hidrodinámica del flujo sobre las redes se registra mediante un indicador de fuerza modelo 128 Enterprice, fabricado por Rice Lake. El equipo recibe estas señales y las interpreta como fuerza, resultado que puede visualizarse instantáneamente en un visor digital y almacenarse directamente en un computador (Figura 1.e). El equipo cuenta con cuatro canales, lo que permite apreciar el valor que percibe cada celda de carga individualmente.

Las redes a ensayar corresponden a mallas de nylon, que a partir de ahora se citarán como la “red pecera” y “red lobera”, que son redes utilizadas en centros de cultivo de peces de la industria acuícola. La red pecera (Figura 1.f) es una red del tipo diamante sin nudos, con un ángulo de apertura de 45°, un diámetro de hilo de 2.5 mm y una separación de la grilla igual a $\Delta l = 30$ mm. La red lobera (Figura 1.d) es una red del tipo cuadrada con nudos, un diámetro de hilo de 5 mm y una apertura $\Delta l = 30$ mm. La imagen de la Figura 1.f, corresponde a una red pecera con fouling al 45%.

Para caracterizar la presencia de fouling en las redes se utilizaron cuerdas de polietileno de 2 mm de diámetro, que se trenzan sobre las redes con el fin de incrementar su área expuesta (Figura 1.f), lo que resulta en un incremento en el índice de solidez de la red. El uso de materiales sintéticos para representar material orgánico se apoya en estudios previos de fuerza de arrastre sobre redes y cilindros (Baarholm & Skaugset, 2008; Nedebrø, 2014; Lader et al., 2015), que indican que estos recrean condiciones hidrodinámicas similares a las del fouling real, siempre y cuando estos reproduzcan su rugosidad, tamaño y rigidez. Además, es importante considerar que preservar el material orgánico fuera de las condiciones naturales puede alterar fuertemente las características del fouling (Lader et al., 2015; Gansel et al., 2017).

Metodología Experimental

Los experimentos realizados consideran dos casos globales de estudio: (1) determinación de la fuerza de arrastre normal a la red y (2) determinación de la fuerza de arrastre tangencial a la red. En el primer caso, la raqueta se orienta perpendicular a la dirección del flujo, mientras que, en el segundo, la red se orienta paralela al flujo.

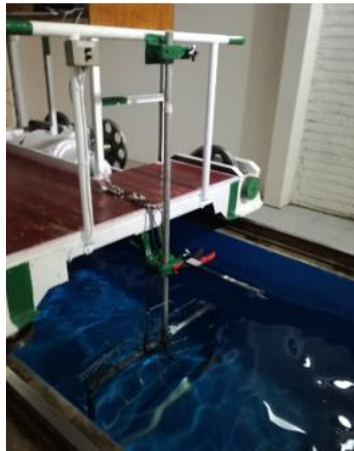
Las redes se sostienen al marco por medio de ganchos que se apoyan sobre las celdas de carga. El modelo AK12 es un tipo de celda que está diseñada para percibir esfuerzos de compresión y, por lo tanto, para determinar la fuerza de arrastre sobre la red, el sensor de las celdas de carga debe orientarse en el sentido del flujo. Para el caso normal de fuerza de arrastre, la red se sostiene tensa desde los cuatro vértices del marco y la fuerza normal de arrastre resultante se distribuye entre cuatro celdas de carga. Para el caso tangencial de fuerza de arrastre, la red se sostiene tensa desde los dos vértices que se exponen directamente al flujo y holgadamente desde los extremos traseros. En este caso, la fuerza tangencial de arrastre resultante se divide entre dos celdas de carga.

Cuando la red se encuentra sumergida, se enciende el indicador de fuerzas y se observa el registro inicial de cada una de las celdas de cargas activas. Estos valores se fijan en cero, procedimiento que es análogo a tarar una balanza. Mediante el control mecánico del carro, se fija un valor de la velocidad y éste comienza a desplazarse hasta alcanzar un valor constante. Simultáneamente, las celdas de carga perciben la fuerza que el flujo ejerce sobre la red y estos valores se visualizan en la pantalla del indicador. Cuando se alcanza velocidad constante, se almacenan los resultados desde el indicador hacia una laptop a una tasa de 960 Hz. La velocidad del carro se determina por medio de un sensor láser que registra el tiempo que éste demora en recorrer una distancia conocida de 10 m. Antes de ajustar la red al marco, las celdas de carga se calibran mediante pesos conocidos.

La solidez de las redes se determinó por medio de fotografías tomadas a las redes limpias y con fouling, acorde a la metodología propuesta por Swift et al. (2006) y Gansel et al. (2015; 2017). Mediante una binarización de la imagen, se determina el área efectiva que es ocupada por la red respecto a la del total de la región ocupan sus hilos.



a)



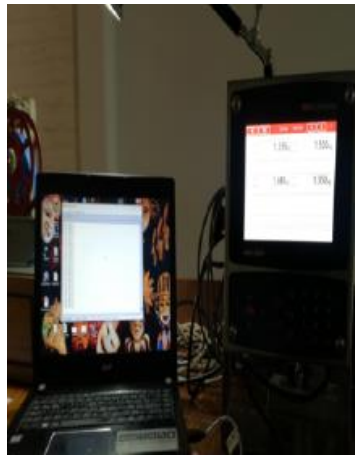
b)



c)



d)



e)



f)

Figura 1. a) Carro de remolque b) Raqueta sujeta al carro c) Raqueta sin red. En sus vértices se ubican las celdas de carga d) Raqueta durante ensayo de fuerza de arrastre normal. En la imagen se observa la red lobera limpia e) Visualización de la fuerza de arrastre durante un experimento en el indicador de fuerzas f) Red pecera con fouling al 45%.

Condiciones Experimentales

La fuerza normal y tangencial de arrastre sobre las redes pecera y lobera se determinan para cuatro escenarios: la situación limpia y tres situaciones con presencia de fouling. Para estos últimos, se consideran los casos en los que la existencia del fouling incrementan el área expuesta de la red limpia a un 30%, 45% y 60%, respecto del área total que es ocupada por sus hilos. En adición a lo anterior, para las condiciones limpia y con fouling de la red lobera, se determinó la fuerza de arrastre que se ejerce sobre un sistema compuesto por la red lobera en cuestión y una red lobera limpia adicional, configuración que recrea una condición de operación real de redes en un centro de cultivo. Al igual que la presencia del fouling, la presencia de una red lobera limpia se traduce en un incremento del índice de solidez. En la Tabla 1, se expone el resumen de los casos de estudio,

donde se indica el tipo de red y su índice de solidez calculado, así como la notación con la cual se referirá en las secciones posteriores.

Cada una de las redes de la Tabla 1 se ensayan para seis velocidades diferentes: 0.4, 0.7, 1, 1.5, 2 y 2.5 m/s, tanto para el caso de fuerza de arrastre normal como para el tangencial. Las velocidades entre 0.4 y 1 m/s simulan corrientes bajo condiciones climáticas normales en los canales australes de la Región de Aysén (Fierro et al., 1999), mientras que las velocidades entre 1.5 y 2.5 m/s, simulan corrientes asociadas a eventos extremos como son las “*corrientes de marea*” (Salinas & Hormazábal, 2004). Cada velocidad se ensaya tres veces, y el valor característico de la velocidad y de la fuerza de arrastre se obtiene a partir del promedio aritmético de estos datos.

Tabla 1. Redes ensayadas durante el trabajo experimental.

Red	Notación individual	S_n
Red pecera limpia	RP	0.220
Red pecera con fouling al 30%	RPF01	0.305
Red pecera con fouling al 45%	RPF02	0.457
Red pecera con fouling al 60%	RPF03	0.604
Red lobera limpia	RL	0.098
Red lobera con fouling al 30%	RLF01	0.306
Red lobera con fouling al 45%	RLF02	0.472
Red lobera con fouling al 60%	RLF03	0.630
Doble red lobera limpia	DRL	0.196
Red lobera con fouling al 30% + Red lobera limpia	DRLF01	0.404
Red lobera con fouling al 45% + Red lobera limpia	DRLF02	0.570
Red lobera con fouling al 60% + Red lobera limpia	DRLF03	0.728

Para las situaciones limpias y con fouling F01 y F02, el área total de la región ocupada por los hilos de la red lobera es de 0.663 m² y para la red pecera este valor es de 0.729 m². Para la condición con fouling F03, el área total se reduce a 0.332 m² y 0.365 m², respectivamente. Esto se debe a que se emplean redes de la mitad del tamaño a la de los casos anteriores, pues, un tamaño mayor para este grado de fouling excede la capacidad máxima de las celdas de carga.

4. RESULTADOS

Fuerza de Arrastre Normal y Tangencial

En las Figuras 2 y 3 se entrega el resultado de las fuerzas de arrastre medidas para el caso normal y tangencial, respectivamente. Los resultados que se presentan están normalizados por el área total de la región ocupada por la red.

Los experimentos de fuerza de arrastre para el caso normal muestran que un alza en el índice de solidez de las redes debido a la presencia del fouling, incrementan la fuerza de arrastre para una misma velocidad de ensayo, resultado que ha sido reportado por otros autores (Swift et al., 2006; Gansel et al., 2015). Para el caso de las redes lóberas, se distingue que la presencia de una segunda red limpia también se refleja en el crecimiento de la fuerza de arrastre, lo que es consistente con el aumento del índice de solidez.

Para los experimentos de fuerza de arrastre tangencial, la presencia del fouling y/o de una red limpia sobre las redes tiene efectos diferentes en las redes pecera y lóbera. Los resultados de la red lóbera muestran que la presencia del fouling y de una red limpia adicional se expresa en el aumento de la fuerza de arrastre respecto al caso limpio de una sola una red, sin embargo, este crecimiento no es tan sensible frente a cambios en el índice de solidez como ocurre para el caso de fuerza de arrastre normal. Para la red pecera, aún cuando la red de mayor índice de solidez es consistentemente mayor que el resto para todas las velocidades de ensayo, las redes con fouling con índices de solidez inferiores a 0.6 (F01 y F02), presentan valores menores que el caso limpio para los ensayos con velocidades de 0.4 y 0.7 m/s. En general, para el rango entre 0.4 y 1.0 m/s la presencia del fouling no muestra un efecto consistente. Para los ensayos realizados entre 1.5 y 2.5 m/s, las redes con fouling alcanzan valores mayores que el caso limpio, pero el incremento en la fuerza de arrastre no es tan sensible a aumentos en el índice de solidez, análogo a lo que ocurre con los experimentos realizados con redes lóberas.

Coefficiente de Arrastre Normal y Tangencial

En la Figura 4, se presentan los coeficientes de arrastre normal obtenidos para las redes pecera y lóbera, la tendencia de los datos muestra que el incremento del índice de solidez, debido a la presencia del fouling o de una segunda red, aumentan el valor del coeficiente de arrastre a igual número de Reynolds, resultado que ha sido verificado en estudios previos que usan redes con fouling (Swift et al, 2006; Gansel et al., 2015). Para una misma solidez, el valor del coeficiente de arrastre disminuye a medida que crece el número de Reynolds, efecto que se nota mucho más pronunciado en las redes con mayores índices de solidez.

En la Figura 5 se exhiben los coeficientes de arrastre tangencial determinados para las redes lóberas y peceras. Para la red lóbera, el crecimiento del índice de solidez debido a la presencia de fouling o de una segunda red, incrementan el valor del coeficiente de arrastre, con respecto al caso simple (RL). Esta alza es mucho más notoria a medida que crece el índice de solidez, y para valores de este parámetro menores a 0.6, no evidencia un efecto tan pronunciado como ocurre para el caso de fuerza de arrastre normal. Para un mismo índice de solidez, aún cuando se distinguen algunas tendencias, los resultados no se muestran tan sensibles frente a cambios en el número de Reynolds

como ocurre en la Figura 4. Este comportamiento también se recupera cuando se observan los resultados de coeficiente de arrastre de la red pecera. Para esta red, la presencia del fouling se aprecia como un incremento en el valor del coeficiente de arrastre de la red pecera con respecto a su caso limpio para valores del número de Reynolds mayores a 2500, que corresponde al rango entre 1.5 y 2.5 m/s de las velocidades ensayadas. Para el resto de las condiciones de flujo, la presencia del fouling incrementa el coeficiente de arrastre sólo para la red con el mayor índice de solidez (RPF03).

5. DISCUSIÓN

En la Figura 6, se presenta la razón entre la fuerza de arrastre tangencial y normal de las redes F_t/F_n , donde F_t y F_n son las fuerzas de arrastre tangencial y normal medidas experimentalmente. Para la red pecera, la razón entre ambas fuerzas es de alrededor del 15 a 20%. La tendencia de los resultados indica que, el incremento del índice de solidez debido a la presencia de fouling tiende a disminuir la razón entre fuerzas para los casos con redes peceras. Esto implica que, para el caso de fuerza de arrastre tangencial, el incremento del índice de solidez no se refleja en un incremento tan pronunciado en la fuerza de arrastre como ocurre para el caso normal. Esto se evidencia al contrastar el caso limpio (RP) con el caso de mayor índice de solidez (RPF03), donde para cada situación, la razón entre fuerzas oscila entre un 20 a 25% y 9 y 16%, respectivamente. Además, se destaca que, a igual solidez, la tendencia muestra un alza de la razón de fuerzas a medida crece el número de Reynolds.

Para la red lobera, los cambios en el índice de solidez debido a la presencia de fouling o de una red limpia no generan un efecto notorio como ocurre con la red pecera. Sin embargo, se destaca que el valor de la razón de fuerzas ronda alrededor del 30%, y para el caso con dos redes loberas limpias, es del orden del 40%, valores que son mayores a los obtenidos con la red pecera. Esto puede indicar que la diferencia en el tipo de red tiene un mayor peso para el caso de fuerza de arrastre tangencial, así como ocurre en el caso de la doble red lobera (DRL), donde la interacción entre dos redes, puede ser un factor para considerar.

Los resultados de coeficiente de arrastre normal de las redes son distinguiblemente consistentes con las tendencias reportadas en la literatura, donde un incremento del índice de solidez de la red se traduce en incremento del coeficiente de arrastre, aun cuando se compara entre redes loberas y peceras. En esta investigación, el crecimiento de la solidez se debe a la presencia de fouling, simulado con material sintético y/o la presencia de una red limpia adicional para los casos con red lobera, y pese a que las redes pecera y lobera tienen grillas de composición y aperturas diferentes, los resultados son bien representados por el índice de solidez para el rango de número de Reynolds ensayado.

Los resultados del coeficiente de arrastre tangencial presentan una tendencia diferenciada entre las redes pecera y lobera. Para la red pecera, el crecimiento del índice de solidez se traduce en un aumento del valor del coeficiente de arrastre sólo para condiciones de flujos con velocidades entre 1.5 y 2.5 m/s. Para los números de Reynolds asociados a las velocidades de ensayo entre 0.4 y 1 m/s, no es posible distinguir claramente el efecto que tiene el incremento del índice de solidez respecto al caso limpio. Para la red lobera, el coeficiente de arrastre de la red limpia crece a medida

lo hace la solidez, cuyo efecto es menos marcado a como ocurre en el caso de fuerza de arrastre normal (Figura 4). En los estudios de Zhou et al. (2015), se indica que el índice de solidez tiene un efecto negativo en el coeficiente de arrastre, vale decir, que un incremento de la solidez disminuye el valor de este coeficiente, que es contrario a lo que ocurre en el caso de fuerza normal. En este estudio, para velocidades mayores o iguales 1.5 m/s, el incremento de la solidez incrementa el coeficiente de arrastre, al igual que para el caso normal. La diferencia entre los estudios de Zhou et al. (2015) y los resultados que acá se presentan, es que Zhou et al. (2015) trabajan sólo con redes limpias, luego, el incremento en el índice de solidez se debe principalmente a las características de la red. En cambio, en este estudio, el incremento de la solidez se debe a la presencia de fouling, que es de un material distinto, con comportamiento hidrodinámico y rugosidad diferente a los de la red, o bien, a la presencia de una segunda red limpia, que agrega como variable la interacción entre redes. Además, los estudios de Zhou et al. (2015) se realizan con velocidades entre 0.4 y 1.1 m/s ($Re \sim 1000 - 4000$), mientras que en este trabajo se presenta un rango más amplio de velocidades. En ese sentido, las únicas redes de estudio que son comparables con las de Zhou et al. (2015) corresponden a las redes lobera y pecera para la situación limpia. Cuando se comparan en la Figura 5, los resultados de esta investigación condicen a lo indicado por los autores, pues, el coeficiente de arrastre de la red pecera es menor que el de la red lobera, pese a tener una mayor solidez. En cambio, cuando se compara el caso con dos redes loberas limpias, el coeficiente de arrastre de esta composición es mayor que el de la red lobera y pecera, resultado que es curioso, pues, esta configuración tiene un índice de solidez similar al de la red pecera, y podría asociarse a la interacción entre redes o a la malla que compone la red y cómo se comporta frente a su interacción con el flujo.

Además, es preciso destacar que, para el caso de fuerza de arrastre normal, los resultados que se obtienen para las redes peceras y loberas, son similares entre sí, y sus diferencias se deben principalmente al índice de solidez que se tiene sobre la red y/o a la dispersión que existe entre las velocidades de ensayo. En cambio, para la fuerza de arrastre tangencial, los coeficientes de arrastre de las redes peceras son menores a los que se obtienen a los casos con redes loberas, y las diferencias pueden ser de hasta un orden de magnitud. Bajo esta mira, las diferencias de patrón de grilla de las redes y aperturas de éstas, pueden ser una variable que genere una distinción entre los resultados que se obtienen. En investigaciones previas se ha discutido la necesidad de incorporar estudios hidrodinámicos del flujo en torno a las redes, pues, factores como la interacción entre sus hilos, la rugosidad del material con la que se fabrican y/o del fouling presente sobre ellas, tienen efectos que no se representan apropiadamente por medio del índice de solidez.

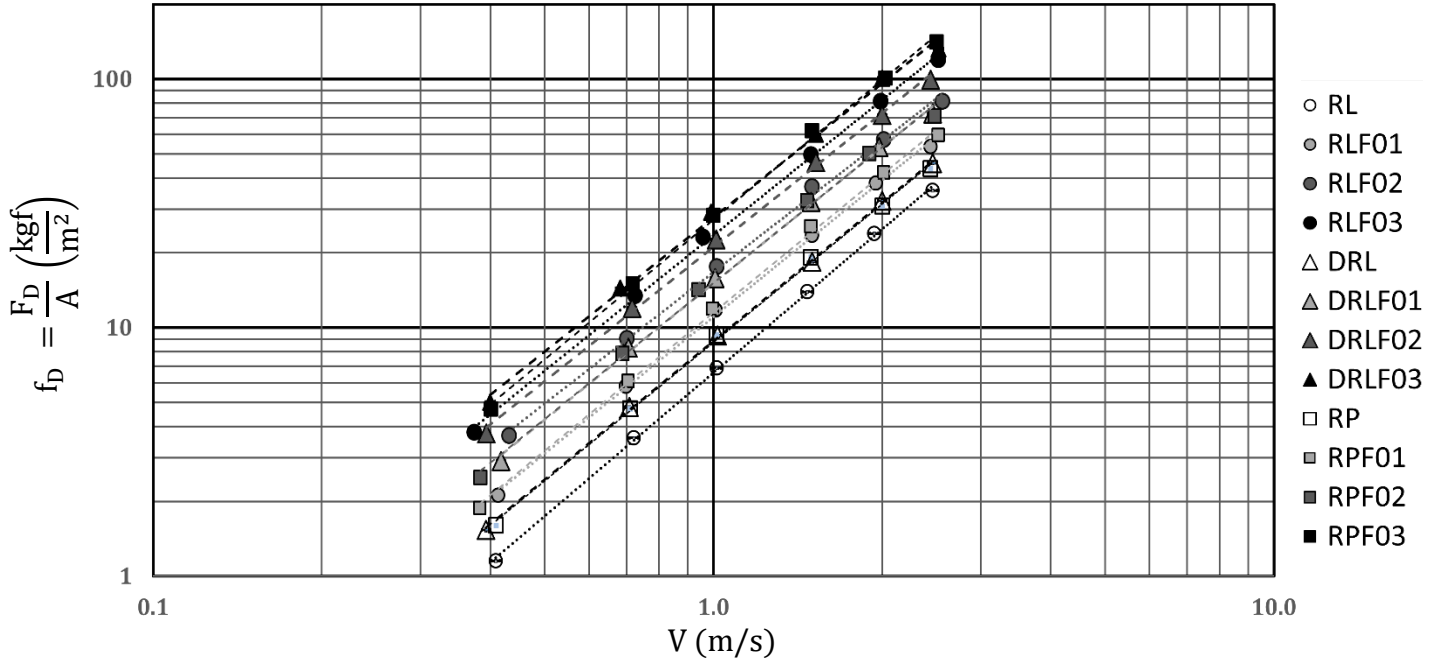


Figura 2. Resultados experimentales de fuerza de arrastre normal para las redes pecera y lobera. Las líneas segmentadas representan un ajuste potencial de los datos.

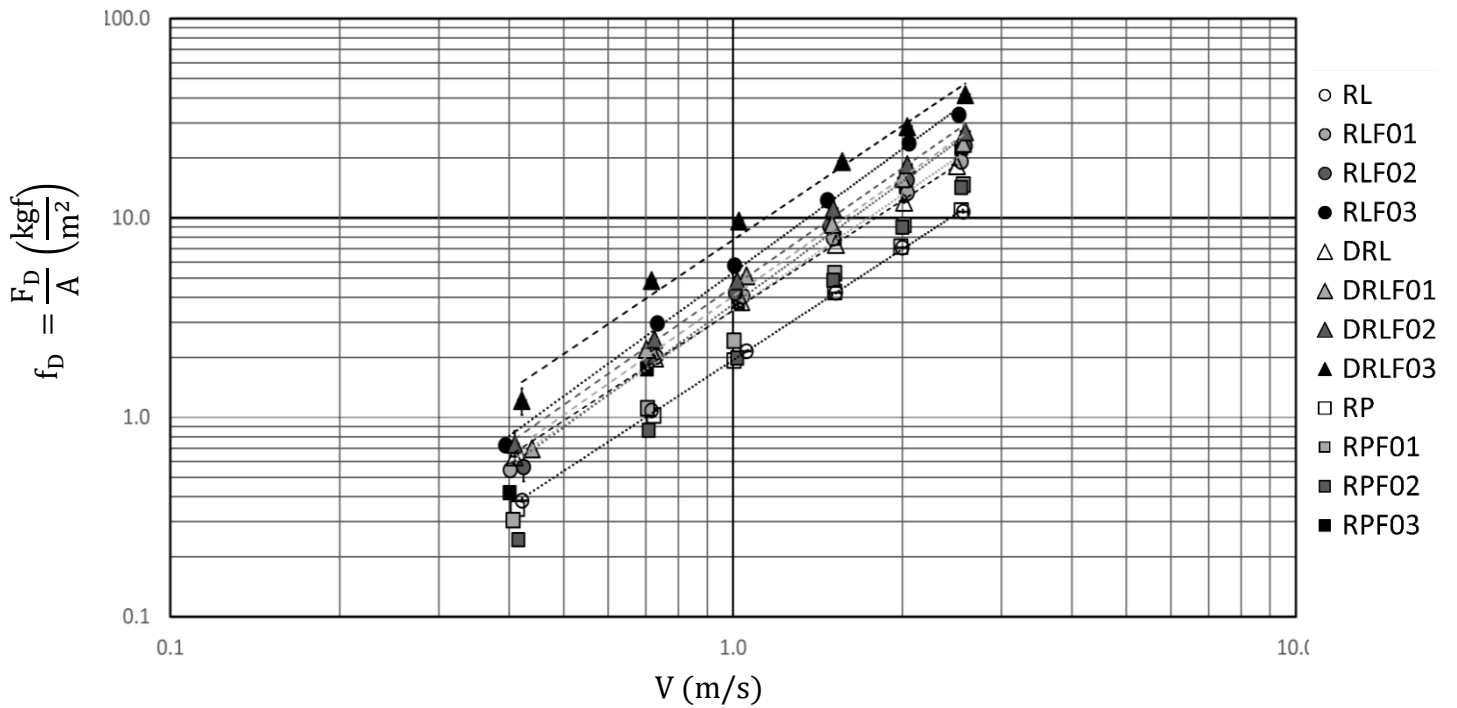


Figura 3. Resultados experimentales de fuerza de arrastre tangencial para las redes pecera y lobera. Las líneas segmentadas representan un ajuste potencial de los datos.

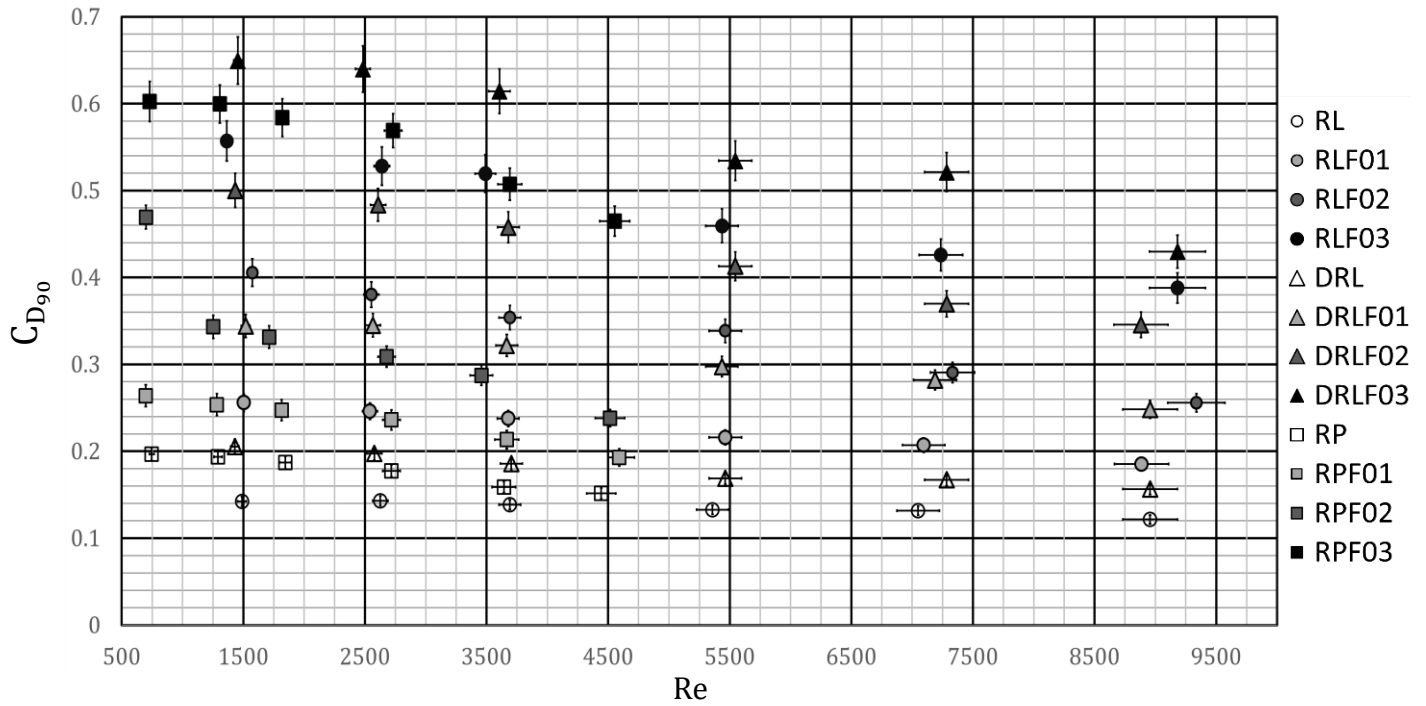


Figura 4. Resultados experimentales de coeficiente de arrastre normal para redes pecera y lobera en función del número de Reynolds.

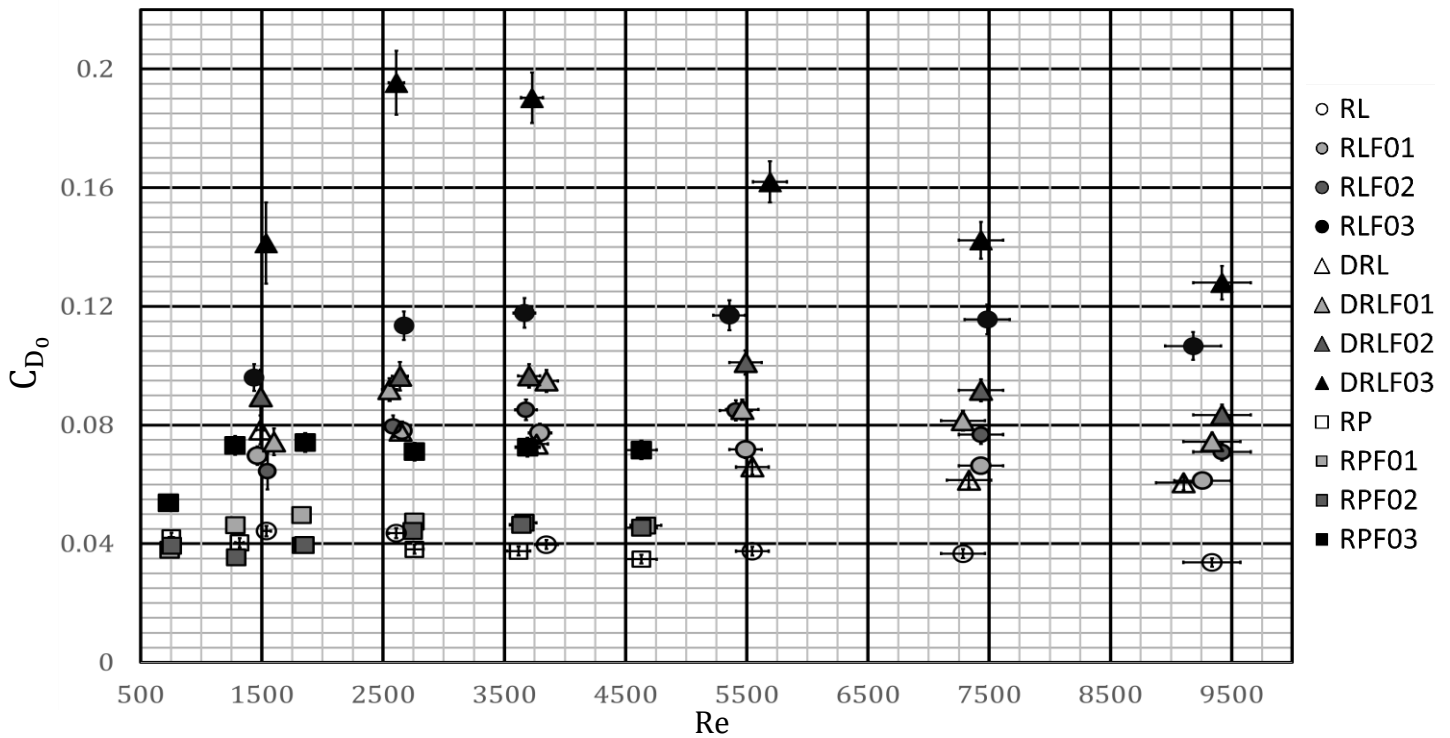


Figura 5. Resultados experimentales de coeficiente de arrastre tangencial para redes pecera y lobera en función del número de Reynolds.

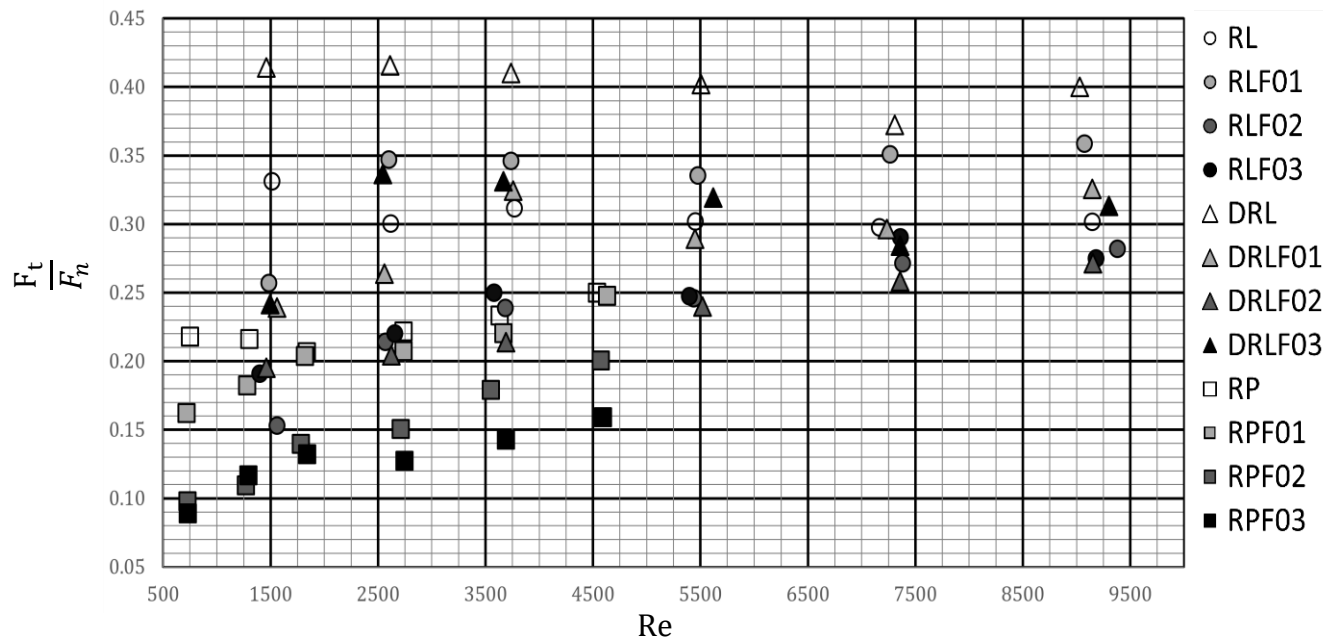


Figura 6. Razón entre la fuerza tangencial y la fuerza normal de arrastre para las redes ensayadas.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de la fuerza de arrastre normal en general coinciden con lo reportado por otros estudios. En particular, el incremento en el índice de solidez debido a la presencia de fouling o de una red limpia adicional, se interpreta como incremento de la fuerza de arrastre total percibida por las redes y del coeficiente de arrastre calculado según la ecuación (5), y el valor de la solidez representa apropiadamente tanto los resultados que se obtienen para redes peceras y loberas, pese a que son de diferente composición de grilla, o presenta la interacción entre dos redes.

Para los resultados de fuerza de arrastre tangencial, los resultados muestran que el incremento del índice de solidez se traduce en un crecimiento de la fuerza y del coeficiente de arrastre de la red lobera con respecto al caso limpio, y para la red pecera, este comportamiento se recuerda sólo para velocidades de ensayo entre 1.5 y 2.5 m/s. Además, los valores de los coeficientes de arrastres de la red pecera son menores que los de la red lobera. Esta distinción lleva a suponer que existen diferencias, que podrían asociarse a la hidrodinámica que se genera en torno a las redes, variable que desconoce el índice de solidez, que caracteriza a las redes exclusivamente en función del área efectiva que estas ocupan.

El principal foco de los resultados presentados es propinar información representativa de las condiciones operacionales a las que se someten los centros de cultivos en los canales australes de la región de Aysén, que permitan enriquecer los diseños de estas obras de ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Yadrán S.A., quien financió el estudio y autorizó la divulgación de los resultados. Esta publicación ha sido cofinanciada por el Proyecto CONICYT AFB180004 y el Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

REFERENCIAS

- Baarholm, R., & Skaugset, K. (2008, January). Modelling and characterization of artificial marine growth. In *ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (pp. 863-870). American Society of Mechanical Engineers.
- Fierro, J., Belmar, J., Rosales, S. & Blanco, J. Caracterización del régimen de mareas en canales interiores en las vecindades de la constricción Meninea. Resúmenes Ampliados Crucero CIMAR Fiordo 4, 76, 1999.
- Gansel, L. C., Jensen, Ø., Lien, E., & Endresen, P. C. (2014). Forces on Nets with Bending Stiffness—An Experimental Study on the Effects of Flow Speed and Angle of Attack. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 136(4), 041201.
- Gansel, L. C., Plew, D. R., Endresen, P. C., Olsen, A. I., Misimi, E., Guenther, J., & Jensen, Ø. (2015). Drag of clean and fouled net panels—measurements and parameterization of fouling. *PloS one*, 10(7), e0131051.
- Gansel, L. C., Bloecher, N., Floerl, O., & Guenther, J. (2017). Quantification of biofouling on nets: a comparison of wet weight measurements and optical (image analysis) methods. *Aquaculture international*, 25(2), 679-692.
- Lader, P., Fredriksson, D. W., Guenther, J., Volent, Z., Blocher, N., Kristiansen, D., ... & Decew, J. (2015). Drag on hydroid-fouled nets—An experimental approach. *China Ocean Engineering*, 29(3), 369-389.
- Le Bris, F., & Marichal, D. (1998). Numerical and experimental study of submerged supple nets: Applications to fish farms. *Journal of marine science and technology*, 3(4), 161-170.
- Madsen, N., Hansen, K., & Enerhaug, B. (2011). Experimental Analysis of The Hydrodynamic Coefficients of Net Panels in The Flume Tank in Hirtshals. *on the Theory of Fishing Gears and Related Marine Systems*, 131.
- Nedrebø, E. L. (2014). *Experimental investigation of marine fouling on piles in currents* (Master's thesis, Institutt for marin teknikk).
- Salinas, S. & Hormazábal, S. Capacidad de transporte de la constricción de Meninea para un flujo de dos capas y el efecto de la corriente de marea. *Ciencia y Tecnología del Mar* (1), 5-15, 2004.
- Swift, M. R., Fredriksson, D. W., Unrein, A., Fullerton, B., Patursson, O., & Baldwin, K. (2006). Drag force acting on biofouled net panels. *Aquacultural engineering*, 35(3), 292-299.
- Tang, H., Xu, L., & Hu, F. (2018). Hydrodynamic characteristics of knotted and knotless purse seine netting panels as determined in a flume tank. *PloS one*, 13(2), e0192206.
- Tsukrov, I., Drach, A., DeCew, J., Swift, M. R., & Celikkol, B. (2011). Characterization of geometry and normal drag coefficients of copper nets. *Ocean Engineering*, 38(17-18), 1979-1988.
- Zhan, J. M., Jia, X. P., Li, Y. S., Sun, M. G., Guo, G. X., & Hu, Y. Z. (2006). Analytical and experimental investigation of drag on nets of fish cages. *Aquacultural engineering*, 35(1), 91-101.
- Zhou, C., Xu, L., Hu, F., & Qu, X. (2015). Hydrodynamic characteristics of knotless nylon netting normal to free stream and effect of inclination. *Ocean Engineering*, 110, 89-97.