

# Desarrollo de superficies hidrodinámicas laminares basadas en el diseño de la piel de tiburón

G. Díez & J. Martínez

Marine Research Division, AZTI-Tecnalia

M. Soto

Research Centre for Experimental Marine Biology and Biotechnology (PiE-UPV/EHU)

J. M. Blanco & I. Bidaguren

Department of Nuclear Engineering and Fluid Mechanics (UPV/EHU)

P. Fernández-Waid

Scripps Institution of Oceanography (Birch Aquarium), University of California

Los tiburones del género *Isurus* están considerados como unas de las especies de peces marinos de natación más rápida, consiguiendo alcanzar una velocidad de hasta 70 km/h, que es considerablemente más rápida de lo que se podría esperar de sus condiciones fisiológicas y de su capacidad muscular. Esta particular eficiencia hidrodinámica, que marca una diferencia en la natación respecto a otras especies de peces, está estrechamente relacionada con el recubrimiento de su piel formada de minúsculas espículas de particular diseño en cada especie (Mullins, 1997; Carlson *et al.*, 2006). Las espículas actúan rompiendo la capa límite del agua en contacto con la piel, de forma que minimizan las turbulencias sobre el cuerpo y, por tanto, reducen considerablemente la resistencia al avance en la natación (Naresh, 1997; Brian *et al.*, 2010).

En años recientes se han realizado investigaciones en el diseño de revestimientos especiales con propiedades aero-hidrodinámicas y que se han ensayado experimentalmente en aviones y barcos, consiguiendo reducciones de la resistencia cuando se orientan en la dirección del flujo del aire y/o agua y, por lo tanto, ahorros significativos de combustible (Ball, 1999). Estos primeros materiales eran simples superficies provistas de acanaladuras microscópicas (*micro-riblet films*), que, si bien eran eficientes desde el punto de vista aero-hidrodinámico, tenían la desventaja de ensuciarse fácilmente, perdiendo de esta forma sus propiedades (Fig 1).

Estas superficies se utilizaron experimentalmente en competiciones deportivas marinas como la Copa América de vela de 1988. En este caso concreto, el velero “*Stars & Strips*” utilizó un revestimiento en el casco fabricado por la empresa 3M (y basado en este principio) que fue prohibido en posteriores competiciones porque

otorgaba a la embarcación una ventaja “sustancial” frente a sus competidores (Bechert *et al.*, 1997; Mullins, 1997). Este material no fue utilizado posteriormente y tampoco se conoce ningún tipo de producto comercial derivado de él hasta el momento.

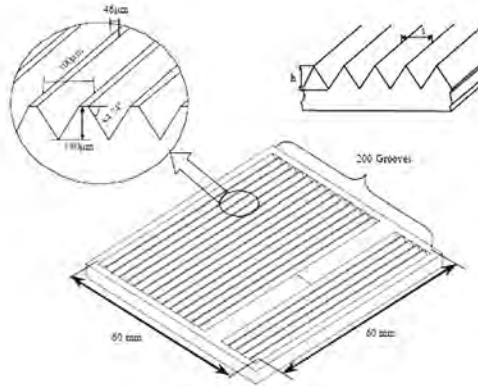


Figura 1. Diseño básico de las acanaladuras laminares desarrolladas para los primeros revestimientos laminares. Fuente: (Lee *et al.*, 2005).

Posteriormente a estas primeras investigaciones, se empezaron a desarrollar de forma todavía incipiente nuevos revestimientos más complejos aplicando el concepto de biomimética, que se basan directamente en el diseño de las espículas de la piel de tiburón con unas geometrías patrón actuantes (Fig 2), tal y como fue presentado por Bechert (2000).

Más tarde, en 2008, 13 de los 14 récords mundiales de natación conseguidos se lograron con la ayuda de trajes de baño de una marca comercial norteamericana. Estos bañadores utilizan en parte tecnología que imita las características de la piel de tiburón y que, según los fabricantes, reducen hasta en un 4% la resistencia en el agua (Britt, 2005).

Actualmente, una compañía japonesa (*Shenzhen B&B Technology Co. LTD*, 2017) está trabajando en el desarrollo de estos tipos de materiales con el fin de sacar al mercado un revestimiento comercial llamado “*shark skin coating*” que definen como un “*polyolefin film*” inspirado en la piel de tiburón para aplicaciones en la industria naval. La ventaja de los materiales diseñados ahora es que, además de ser de gran eficacia hidrodinámica, son capaces de evitar en un 85% el ensuciamiento de las superficies de los cascos por la adhesión de organismos marinos (*fouling*), que son los responsables por si mismos del incremento de la resistencia en el agua hasta en un 15% (Britt, 2005). La eficacia del revestimiento inspirado en la piel del tiburón es tal que en las pruebas de laboratorio las algas tan sólo consiguen adherirse en las zonas donde el revestimiento tiene algún pequeño defecto

de fabricación (Schumacher *et al.*, 2007). Así, las ventajas de este tipo de materiales en el ámbito naval son varias; por una parte, aumentan la eficacia hidrodinámica de los cascos de los barcos reduciendo el consumo, reducen los costos de mantenimiento (auto-limpieza) de los cascos de las embarcaciones, y a su vez evitan el uso de pinturas “*antifouling*” muy contaminantes por su alto contenido en TBTs, Cu o Zn (Brady, 2000; Callow, 2002; Hoipkemeier-Wilson *et al.*, 2004).



Figura 2. Modelo de revestimiento para análisis de la reducción de la resistencia aerodinámica basado en el diseño de las espículas de tiburón. Fuente: (Bechert *et al.*, 2000)

Si bien hasta el momento, animados por las ventajas que podría generar este revestimiento, se están realizando prometedores trabajos de investigación en este campo, todavía no se ha conseguido fabricar ninguno de estos productos de forma comercial. Parece, por lo tanto, una buena oportunidad para dedicar esfuerzos a la investigación básica y dar los primeros pasos en esta línea con el objetivo de situarse en una posición favorable de cara al nuevo y amplio mercado que se espera para estos materiales en un futuro cercano.

El capítulo se plantea como un estudio interdisciplinar entre cuatro entidades que vienen trabajando de forma conjunta desde hace más de 10 años y que aportarán, con su personal y equipos, la experiencia que poseen en diferentes áreas de conocimiento necesarias para conseguir los resultados planificados. En este sentido, la *Unidad de Investigación Marina de AZTI Tecnalia* posee el conocimiento contrastado de numerosos estudios de biología de especies marinas y la experiencia en el diseño, pruebas e implementación de nuevas tecnologías en el ámbito naval pesquero. El *Grupo de offshore de mecánica de fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la UPV/EHU* es un centro experto en la simulación de modelos hidrodinámicos de flujos mediante software especializado y salas de simulación. El *Laboratorio de Biología Celular y Toxicología Ambiental (BCTA) de la UPV-EHU (Estación Marina de Plentzia)*, junto con el *Birch Aquarium de Scripps*

*Institution of Oceanography (UC San Diego)*, aportará su amplio conocimiento de las técnicas para el análisis ultraestructural de tejidos mediante sus equipos de microscopía electrónica tanto de transmisión como de barrido, y el análisis mediante microscopía confocal.

## Objetivos

Los objetivos específicos que se describen a continuación tienen relación directa con el enfoque biológico y tecnológico implícito en un estudio de esta naturaleza.

- El primer objetivo pretende correlacionar la forma, el tamaño, la densidad y la distribución de las espículas de la piel de un tiburón con las cargas hidrodinámicas que se producen en su cuerpo durante la natación. La morfología de las espículas de tiburón está descrita para varias especies ya que se utiliza en algunos casos como criterio para su correcta identificación taxonómica (Compagno, 1984). Desde hace tiempo se conoce la responsabilidad de las espículas en la eficacia de la natación. Sin embargo, no se ha descrito en ninguna especie de tiburón el diseño, tamaño, densidad y la distribución de las espículas en la superficie del cuerpo ni se han correlacionado estas variables con las cargas hidrodinámicas del cuerpo de ninguna especie.
- El segundo objetivo es realizar mediante software de simulación un estudio teórico de las cargas hidrodinámicas en un modelo de tiburón. Se comparará la eficacia del modelo básico con otro que incorpore en su diseño las características aprendidas del modelo tiburón (Becherd *et al.*, 1997), simulando en el proceso la aplicación de superficies laminares hidrodinámicas diseñadas en función de los resultados obtenidos en el primer objetivo.

## Metodología

Se van a describir a continuación las cuatro tareas que se han llevado a cabo en este estudio.

### *Obtención de las muestras*

Se capturaron tres tiburones pelágicos de la especie marrajo (*Isurus oxyrinchus*) por encargo de AZTI a una embarcación de palangre con base en el puerto de Ondarroa (País Vasco). Los tiburones se pescaron con la piel en perfectas condiciones, ya que para ello el barco estaba provisto de fundas de lona para proteger

al tiburón durante su manipulación en cubierta y almacenamiento en la bodega. Inmediatamente después de su recepción en puerto, los tres ejemplares se transportaron al centro de AZTI en Sukarrieta, y se almacenaron congelados a  $-20^{\circ}\text{C}$  sobre unos soportes aislados del suelo para mantener su forma y protegerlos individualmente con una envoltura de plástico. Con ello se ha logrado mantener a los especímenes con la estructura lo más similar posible a su estado natural y con la piel intacta, que era el objetivo más importante de esta tarea.

#### *Caracterización de las proporciones y formas del escualo*

Sobre uno de los ejemplares congelados se obtuvieron fotografías digitales (*Olympus E-520*) de los detalles de la morfología a tamaño real y de las tres vistas en alzado, perfil, planta con referencias métricas y distancias conocidas para fijar posteriormente las proporciones de forma correcta. Sobre las proyecciones de estas fotografías en un programa de diseño gráfico (*Adobe Illustrator 10*) se anotaron las distancias (mm) de todos los puntos de referencia taxonómicos y se reconstruyó el alzado, perfil, planta con exactitud milimétrica. A partir de estas tres vistas y mediante software de diseño gráfico *3D Studio max 9* se realizó una reconstrucción en tres dimensiones del ejemplar que serviría como base para las proyecciones de los estudios de densidad y orientación de las espículas a lo largo del cuerpo del tiburón.

#### *Estudio de la morfología de las espículas en las distintas zonas -Metodología de análisis de densidad y orientación-*

Sobre la mitad izquierda del segundo ejemplar de marrajo se diseccionaron con ayuda de un bisturí 69 muestras de piel de  $5 \times 5$  cm del cuerpo del tiburón. Las muestras siguieron un esquema de muestreo a lo largo de 6 ejes longitudinales y 15 verticales a través del cuerpo, además de las aletas dorsales, pectorales y caudales. El corte inferior de cada una de las muestras de piel estaba referenciado sobre el eje longitudinal del tiburón que va desde la nariz hasta la quilla de la aleta caudal. Para la corrección de la desviación del ángulo de corte respecto al eje de referencia nariz-quilla el corte de referencia en la muestra de piel se realizó con la ayuda de un inclinómetro digital de dos ejes (*LD-2M Level Developments*). Las muestras de piel se conservaron en placas de Petri individuales correctamente identificadas y congeladas a  $-20^{\circ}\text{C}$ .

En un microscopio *Olympus zoom estereo SZX12* y sobre una plantilla transparente de  $1 \text{ cm}^2$  cuadrículada cada  $\text{mm}^2$  que se colocó sobre cada muestra se hizo el recuento directo de la densidad de espículas por  $\text{mm}^2$ . Sobre cada muestra se realizaron 30 recuentos en 30 de los cuadrados de  $1 \text{ mm}^2$  elegidos al azar en

la plantilla. De esta forma, se obtenía el promedio y la desviación estándar de la densidad ( $n^{\circ}$  espículas/ $\text{mm}^2$ ) en cada muestra de piel.

Para el análisis comparativo de la densidad de espículas, los 6 ejes longitudinales se agruparon según su altura respecto al cuerpo: 1 dorsal (L1), 1 lateral superior (L2), 1 lateral inferior (L3), 1 ventral (L4) y 1 central (L5) y ventral superior (L6) y los 3 ejes verticales; anterior (V1), medio (V2) y posterior (V3) (Figura 3). Se estimó la variación de las diferencias en la densidad de cada grupo de muestras mediante el test de comparación de medianas Mann-Whitney (Wilcoxon) en *STATGRAPHICS Plus 5.0*. La densidad obtenida de las muestras de piel de las aletas tuvo un análisis estadístico diferenciado de las muestras del cuerpo.

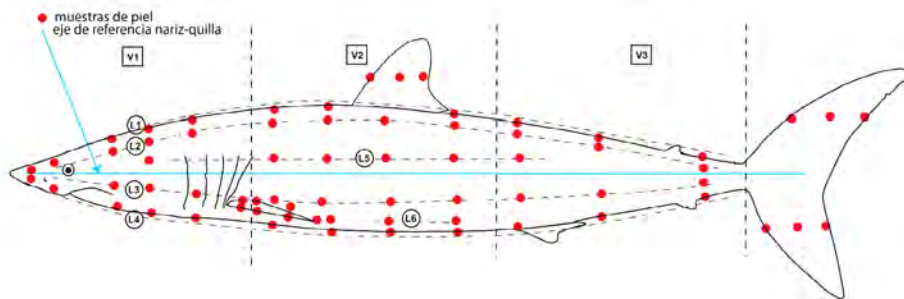


Figura 3. Esquema de la distribución de los ejes longitudinales y verticales y la situación de las muestras de piel analizadas.

Para el estudio de la orientación de las espículas respecto al eje longitudinal del tiburón, cada una de las 69 muestras de piel se fotografió a 32 aumentos con una cámara digital *Olympus C-5050 Zoom* acoplada al microscopio *SZX12* y se importaron en formato .jpg al programa *Adobe Illustrator 10*.

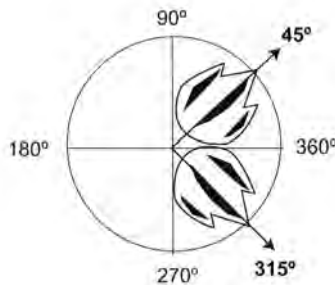


Figura 4. Esquema de la medición de la desviación angular de las espículas respecto al eje horizontal de corte.

El ángulo del corte inferior se ajustó en *Illustrator* de forma que formase un ángulo de 0° respecto a la horizontal del eje referencia nariz-quilla. Posteriormente, mediante la herramienta de cálculo angular del programa se anotaron en 25 espículas elegidas al azar los grados de desviación respecto al eje de referencia nariz-quilla con un segmento que pasaba por el eje postero-anterior de cada espícula. Puesto que la orientación el borde posterior dentado de las espículas se orienta siempre hacía la parte posterior del cuerpo, el ángulo respecto al eje de referencia estará siempre entre el arco que comprenden los ángulos de 90° y 270° (ver esquema de Figura 4).

#### *Metodología de análisis de la morfología y tamaño*

Sobre la mitad derecha del segundo ejemplar se diseccionaron, en posiciones equivalentes a las muestras del lado izquierdo, 27 muestras de piel para el estudio de la morfología y tamaño de las espículas.

Se procesaron las muestras de tegumento de tiburón para su observación en el Microscopio Electrónico de Barrido según el protocolo utilizado por el *Servicio General de Microscopía Analítica y de Alta Resolución en Biomedicina* (SGIKER, UPV/EHU) y que se describe a continuación:

- a. Fijar con 2% glutaraldehído en tampón Cacodilato 0.1 M (pH=7.4), durante 1h a temperatura ambiente.
- b. Lavar 3 veces durante 10 min con Tampón Cacodilato + Sacarosa isosmolar con el fijador.
- c. Postfijar con 1% OsO<sub>4</sub> en Cacodilato, 1h en oscuridad a 4 °C.
- d. Lavar 3 veces con Cacodilato, 10 min.
- e. Deshidratar en serie creciente de etanol (30%, 50%, 70%, 90%, 96%, y 2 baños de alcohol absoluto), 10 min en cada baño.
- f. Desechado al punto crítico. Como alternativa, se puede lavar dos veces en hexametildisilazano 10 min y dejar secar.
- g. Colocar las muestras sobre soportes de microscopio electrónico de barrido utilizando cemento conductor.
- h. Recubrimiento metálico con oro en atmósfera de Argon (*Jeol ion sputter JFC-1100*)
- i. Visualizar y fotografiar en un microscopio electrónico de barrido (*Hitachi S-4800*).

Sobre las micrografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido se calcularon las dimensiones máximas (longitud antero-posterior, y anchura) según el esquema de la figura 5. Se cuantificaron ambas dimensiones en, al menos, 10

espículas por zona de muestreo (Total de >300 espículas).

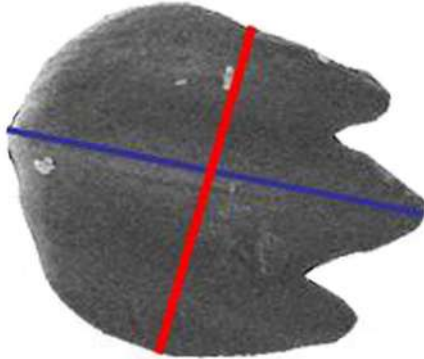


Figura 5. Dimensiones máximas de las espículas de tiburón. En azul la dimensión mayor del eje anteroposterior, y en rojo la anchura máxima.

## Estudio de la hidrodinámica del tiburón

El primer paso para el estudio de la hidrodinámica de la piel del tiburón fue la obtención de un modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de uno de los ejemplares de marrajo para su análisis con el Software *ANSYS FLUENT* (2013). Los métodos CFD's constituyen el tercer enfoque en el estudio y desarrollo de la dinámica de fluidos junto con la teoría y la experimentación. Los resultados que aportan los códigos CFD's son análogos a los que se obtienen en el laboratorio con túneles de viento, ya que ambos son un conjunto de datos para una configuración de flujo dado. Este tipo de análisis complejos y con miríadas de datos ha sido posible, por un lado, gracias a la rápida evolución de los ordenadores en cuanto a velocidad y capacidad de memoria, y por otro, al desarrollo de algoritmos numéricos más precisos.

Como paso previo, se realizó una reconstrucción CAD (modelo sólido) en formato STL sobre uno de los ejemplares de tiburón congelados con la ayuda de un escáner laser de operación manual (Modelo *Handyscan*). Posteriormente, sobre el modelo CAD resultante del escaneado se reconstruyó la nube de puntos con software de ingeniería inversa y se obtuvo la versión final del modelo STL mediante superposición de superficies NURBS. El archivo resultante era una estereolitografía a tamaño real del tiburón con una malla compuesta de más de cuatro millones de caras faceteadas.

El segundo paso de tratamiento de geometría consistió en reducir éste número de superficies tratando de perder la menor cantidad de detalle posible. Para ello, se recubrieron estas superficies tan detalladas por otras con longitud de arista



como máximo de 10 mm con la herramienta de mallado ICEM (Figura 6).

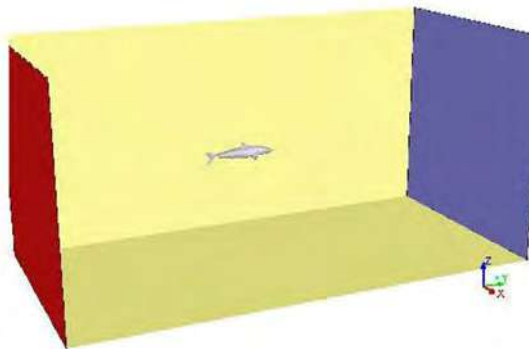


Figura 6. Geometría final escaneada en 3D del cuerpo del tiburón.

En los ojos, la boca, las branquias y la parte posterior de aletas y cola, la simplificación fue necesaria a fin de evitar intersecciones entre caras y así conseguir una superficie global cerrada. Una vez obtenido el perfil de tiburón, se procedió a generar el dominio del estudio o volumen de control. El escualo en tamaño real era de una longitud aproximada de 1,2 m, por lo que se decidió incluirlo en un volumen de agua de  $4 \times 4 \times 5,2$  m de largo en la dirección del flujo (dominio).

La discretización de este dominio (volumen de agua + tiburón) se realizó de abajo a arriba, mallando en primer lugar la superficie, el perfil del escualo (Figura 7A). Para mallar esta superficie se tomó un tamaño de elemento máximo de 2 mm, clave para una buena distribución del centroide de los elementos adyacentes a la pared según la teoría  $y_p^+$ . Así, la malla CFD contiene  $2'05e^6$  celdas en total, cuyo detalle alrededor del cuerpo del tiburón se puede visualizar en la Figura 7B.

A



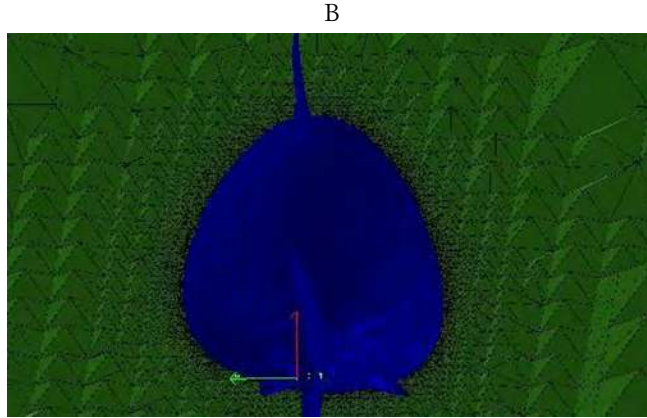


Figura 7. A) Dominio computacional y B) Detalle de la malla alrededor del tiburón.

La turbulencia se podría definir como un fenómeno de inestabilidad intrínseca del flujo y provoca que el fluido pase a comportarse de forma aparentemente caótica. De una manera descriptiva podría hablarse de la formación de torbellinos, más o menos aleatorios, alrededor de la dirección media del movimiento. Surge cuando la velocidad del fluido supera un umbral específico, por debajo del cual las fuerzas viscosas amortiguan el comportamiento caótico. El valor de turbulencia viene dado por el denominado *número de Reynolds* (Re) que es la proporción de fuerzas de inercia a las viscosas:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (1)$$

Siendo  $\rho$  y  $\mu$  la densidad y viscosidad del agua del mar respectivamente,  $U$  la velocidad promedio con la que avanza el flujo marino y  $L$ , la longitud del escualo.

Este modelo hace que el coeficiente de viscosidad turbulenta (CV) dependa de los parámetros medios de flujo y turbulencia, lo cual ha sido sugerido por muchos autores y está bien fundamentada por evidencia experimental (Lion *et al.*, 1995; Atta *et al.*, 2007) Las ecuaciones del modelo turbulento “Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$ ” (ANSYS, 2013) vienen dadas por:

$$D/D_t (\rho k) = \left( \partial/\partial x_j \right) \left[ \left( \mu + \left( \mu_t \cdot \sigma_k^{-1} \right) \right) \cdot \left( \partial \epsilon / \partial x_j \right) \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$D/D_t (\rho \epsilon) = \left( \partial/\partial x_j \right) \left[ \left( \mu + \left( \mu_t \cdot \sigma_\epsilon^{-1} \right) \right) \cdot \left( \partial \epsilon / \partial x_j \right) \right] + C_{g1} \cdot \epsilon \cdot k^{-1} \cdot G_k - \rho \cdot C_{g2} \cdot \epsilon^2 \cdot k^{-1} \quad (3)$$

Siendo  $G_k$  la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidades principales,  $k$  la energía cinética turbulenta,  $\epsilon$  el ratio de disipación turbulenta y  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  los números de Prandtl de energía y disipación respectivamente. Para el análisis se considera toda la superficie del tiburón pero con menos detalle en lo que respecta a la piel por el costo computacional que conllevaría (Wu *et al.*, 2010). Así que se plantean tres casuísticas:

1. Superficie lisa:  $K_s = 0.001$  mm (caso 1)
2. Superficie de rugosidad media:  $K_s = 0.250$  mm (caso 2)
3. Superficie de rugosidad máxima:  $K_s = 0.500$ mm (caso 3)

Los coeficientes analizados mediante CFD fueron:

- Coeficiente de Arrastre ( $C_d$ ) en la dirección del flujo que es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de cualquier objeto dentro de un entorno fluido como el aire o el agua. Comprende los efectos de los dos factores básicos que contribuyen a la fricción dinámica de fluidos: fricción de la piel y arrastre de la forma. Viene dado por la expresión:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho \cdot U^2 \cdot A} \quad (4)$$

Siendo  $F_d$  la componente de la fuerza en dirección al flujo y  $A$  es el área de referencia.

- Coeficiente de Sustentación ( $C_l$ ) en la dirección perpendicular al flujo, que es una cantidad adimensional que se utiliza para cuantificar el efecto de elevación sobre cualquier objeto dentro de un entorno fluido como el aire o el agua, debido a la diferencia de presión alrededor de sus caras superior e inferior. Viene dado por la expresión:

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho \cdot U^2 \cdot A} \quad (5)$$

Siendo  $F_l$  la fuerza de sustentación en dirección perpendicular al flujo.

- Coeficiente de fricción superficial ( $C_{f/2}$ ) a lo largo de toda la superficie exterior que es una cantidad adimensional que representa la tasa de energía disipada

por las tensiones de pared. Viene dado por la expresión:

$$C_f / 2 = \frac{\tau_w}{\rho \cdot U^2} \quad (6)$$

Siendo  $\tau_w$  el tensor local de tensiones de las paredes.

## Resultados

### *Descripción de los parámetros morfológicos en las distintas zonas*

#### *-Resultados del análisis de morfología; descripción general-*

La muestra tomada en la zona del hocico presenta unas espículas de grandes dimensiones (L: >200  $\mu\text{m}$ ; W: >190  $\mu\text{m}$ ) sin ningún tipo de estriación anteroposterior (o muy tenue) con una forma muy redondeada (Figura 8A). Esta escama es muy parecida a la marginal de la aleta (ver más adelante).

El resto de las espículas de las diferentes zonas muestran una estriación característica, con una base ancha (que se inserta en el tegumento) y una espina que se proyecta hacia atrás (Figuras 8B-C). Su ordenamiento general es en hileras diagonales, tal y como se aprecia en la vista panorámica de la Figura 8C. En el detalle de la Figura 8B se observa la potente acumulación de fibras de colágeno (*ceratotrichia*) presente en la dermis.

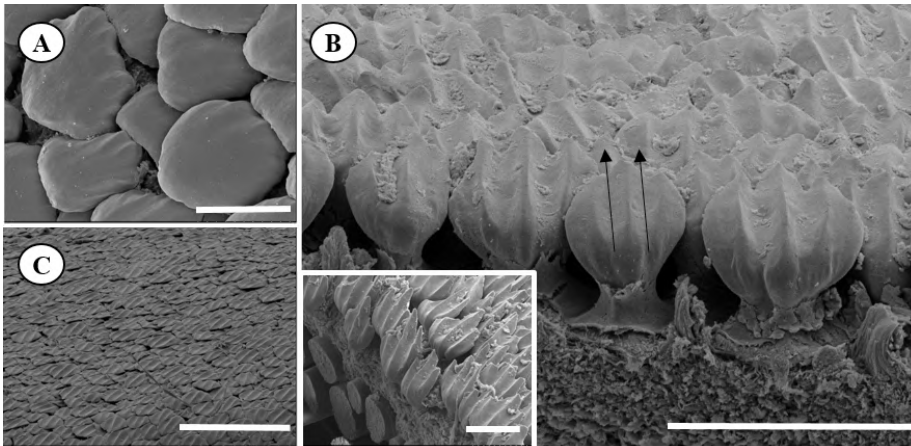


Figura 8. A). Espículas típicas de la zona del hocico (Muestra n° 1). B) Espículas con estriación característica. Detalle de la inserción de la base de la escama en el tegumento. Las flechas indican la entrada de la corriente de agua superficial siguiendo la estriación. C) Panorámica general

superior mostrando el ordenamiento de las espículas. Barras de Escala: A, B= 200  $\mu\text{m}$ ; Detalle en B= 100  $\mu\text{m}$ ; C= 400  $\mu\text{m}$ . Nota: sobre algunas de las espículas se observa la presencia de gránulos correspondientes a la secreción mucosa del epitelio que no pudieron ser lavados durante el procesamiento de la muestra.

### Zona Lateral

Los resultados de las tres zonas discriminadas se presentan en la Tabla 1. Así, para la zona lateral superior (L1), en la que se han eliminado los resultados correspondientes a la aleta dorsal, se observa que la zona del hocico presenta las espículas con mayor tamaño y menor estriación.

*Tabla 1.* Caracterización morfológica (Longitud y anchura, valores medios y sd desviación estándar) de las espículas correspondientes a las zonas de muestreo en los 3 diferentes transectos seleccionados (ver su localización en Figura 3), Zona Lateral Superior (L1), Lateral media (L5) y Lateral Inferior (L4). Los números de las espículas se ilustran en las zonas de las Figuras 9-13.

Z. L. Superior (L1)		Longitud ( $\mu\text{m}$ )		Anchura ( $\mu\text{m}$ )	
Zona	media	sd	media	sd	
1	229,2	23,6	194,4	23,3	
5	153,0	7,8	135,5	11,1	
14	160,3	12,8	153,5	13,3	
25	167,5	3,3	128,7	7,1	
37	135,0	9,6	109,8	10,1	
Z. L. Media (L5)		Longitud ( $\mu\text{m}$ )		Anchura ( $\mu\text{m}$ )	
Zona	media	sd	media	sd	
7	168,3	15,3	128,5	20,8	
16	184,5	16,0	164,8	13,2	
27	217,7	9,1	173,7	8,1	
38	115,8	12,8	88,3	9,6	
Z. L. inferior (L4)		Longitud ( $\mu\text{m}$ )		Anchura ( $\mu\text{m}$ )	
Zona	media	sd	media	sd	
8	166,2	7,1	130,7	7,6	
18	163,8	8,9	118,8	10,8	
29	171,1	9,5	117,0	6,1	
38	115,8	12,8	88,3	9,6	

Sin embargo, en la zona superior de la cabeza (zona 5) se observa una disminución importante tanto del tamaño como de la anchura de las espículas, mostrando

además una estriación suave (no tanto como en la zona 1) que se mantiene hasta la zona 14 (Figura 9).

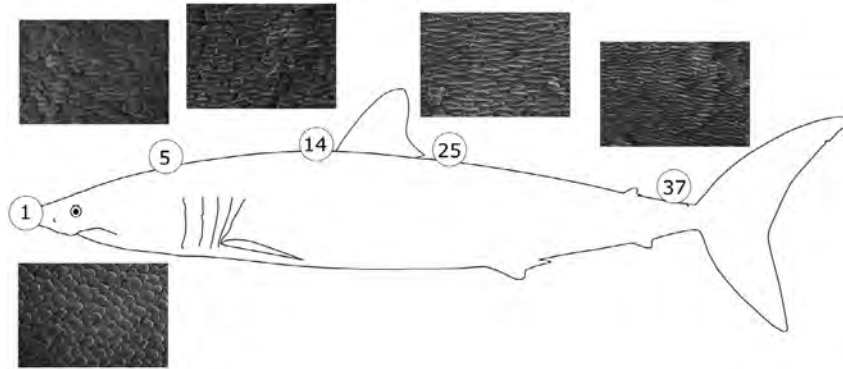


Figura 9. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en el transecto lateral superior (L1).

En la zona lateral media (L5) se observa un patrón similar con espículas de dimensiones reducidas (115 y 88  $\mu\text{m}$ ) en la zona 35 (anterior a la aleta caudal) (Figura 10). Es de destacar la marcada estriación de todas las espículas a partir de la zona 16. La zona que presenta las dimensiones mayores (aparte del hocico) es la zona 17 (zona lateral media), aunque con una estriación muy marcada.

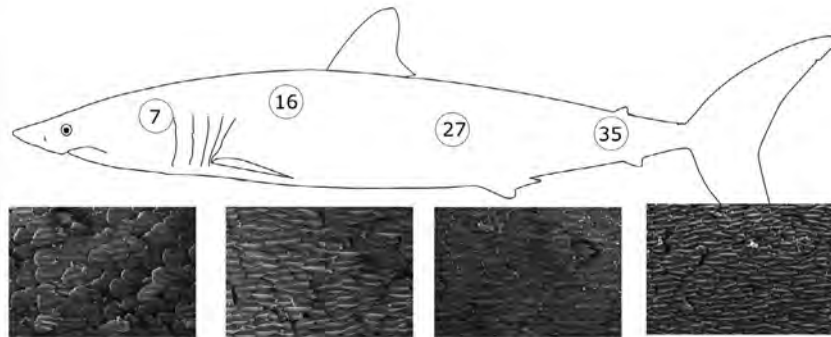


Figura 10. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en el transecto lateral medio (L5).

En la zona lateral inferior (L4) todas las espículas presentan un tamaño más reducido que el resto (dentro de la misma latitud corporal), aunque todas ellas poseen una estriación muy marcada (Figura 11).

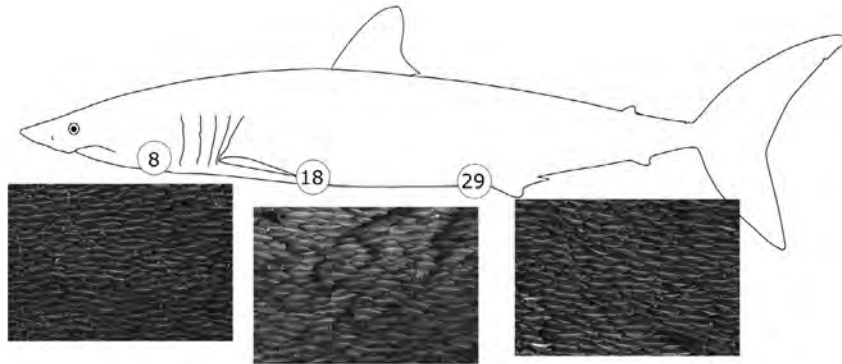


Figura 11. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en el transecto lateral inferior (L4).

En el caso de la aleta dorsal, si se comparan la zona del borde de ataque (zona 19) y la zona posterior de la aleta (21) se observan diferencias importantes (Tabla 2). Así, en la zona de ataque el tamaño (longitud x anchura) es bastante mayor que en la zona posterior, y además la estriación no es tan marcada. Esta estriación es muy evidente en la zona posterior (Figura 12).

En el caso de la aleta caudal, las espículas correspondientes a la zona superior (39) y la inferior (42) presentan dimensiones similares (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización morfológica (Longitud y anchura) de las espículas correspondientes a las aletas dorsal y caudal. Leyenda como en Tabla 1.

Aleta Dorsal		Longitud ( $\mu\text{m}$ )		Anchura ( $\mu\text{m}$ )	
Zona	media	sd	media	sd	
19	198,5	13,6	153,6	7,4	
21	148,8	9,9	116,0	7,2	
Aleta Caudal		Longitud ( $\mu\text{m}$ )		Anchura ( $\mu\text{m}$ )	
Zona	media	sd	media	sd	
39	160,3	9,3	132,6	5,6	
42	169,0	7,3	133,2	9,7	
41	172,3	10,1	118,6	12,0	
44	126,7	11,0	91,1	12,6	

En ambos casos (39, 42), sin embargo y a pesar de presentar estrías, tienen una forma más redondeada que las inmediatamente anteriores a la aleta (Figura 13). En la zona posterior a la zona superior (41) las espículas son similares. Sin

embargo, las espículas de la zona posterior a la zona inferior (44) son mucho más reducidas.

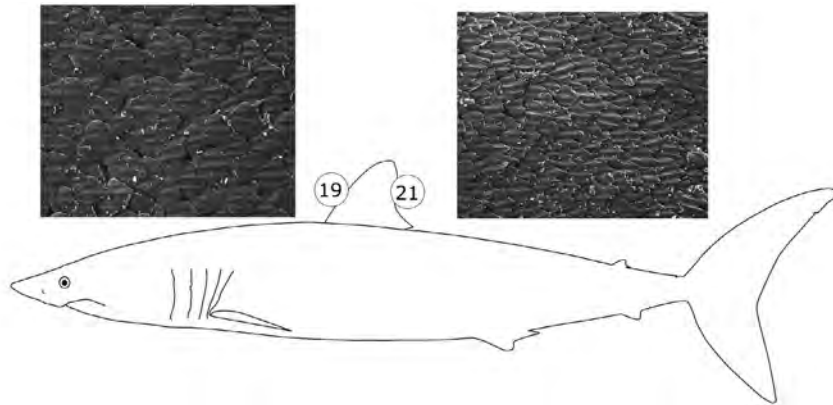


Figura 12. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en la aleta dorsal.

En el caso de la aleta pectoral (Tabla 3), para el borde de ataque de la zona dorsal (46) observamos que las dimensiones de las espículas son mucho más grandes y redondeadas que las de la zona de fuga (47). Además, las de la zona de ataque presentan una estriación muy poco marcada en comparación con las de la zona de fuga (Figura 14).

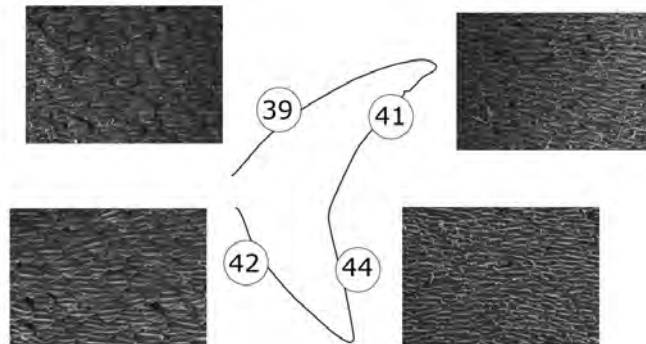


Figura 13. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas seleccionadas en la aleta caudal



Tabla 3. Caracterización morfológica (Longitud y anchura) de las espículas correspondientes a la aleta pectoral (zonas dorsal y ventral). Leyenda como en tabla 1.

Zona Dorsal		Longitud ( $\mu\text{m}$ )		Anchura ( $\mu\text{m}$ )	
Zona		media	sd	media	sd
46		235,9	20,6	214,3	4,7
47		141,6	19,1	113,1	11,2
Zona Ventral		Longitud ( $\mu\text{m}$ )		Anchura ( $\mu\text{m}$ )	
Zona		media	sd	media	sd
49		139,5	8,0	128,0	6,2
50		128,9	6,4	112,9	4,0

Si observamos la aleta pectoral en su zona ventral (49, 50), observamos que ambas son más pequeñas que las de la zona dorsal, aunque se vuelve a repetir el mismo patrón de estriación: mucho más marcado en el borde de fuga que en el de ataque.

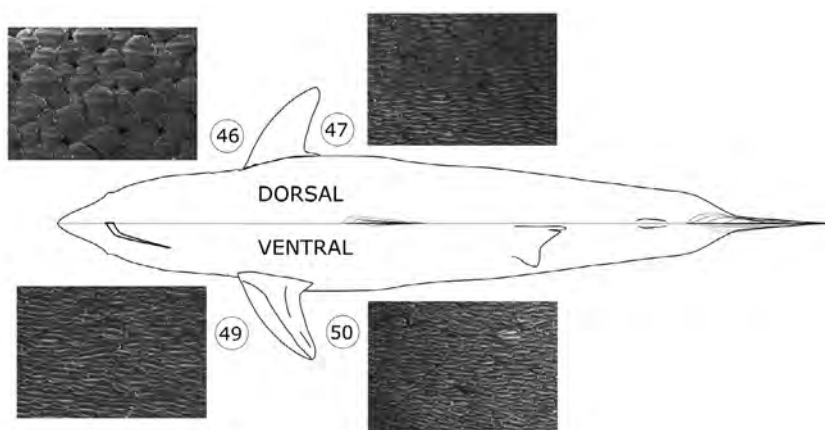


Figura 14. Micrografías correspondientes a las espículas de las zonas dorsal y ventral de la aleta pectoral

### Resultados del análisis de densidad y orientación

El análisis de la densidad de espículas por  $\text{mm}^2$  en las 69 muestras analizadas indica una clara zonación en sentido longitudinal y vertical del tiburón.

La representación de la densidad en los cinco ejes longitudinales indica que la mayor densidad se encuentra en las zonas dorsales (L1) y ventrales (L4). La densidad disminuye hacia el centro del tiburón (L2, L3) y la menor densidad se

encuentra en la zona central respecto al eje longitudinal (L5) (Figura 15).

El análisis en sentido vertical indica que existe una clara mayor densidad de espículas por  $\text{mm}^2$  en la zona superior, disminuyendo a su menor valor en el centro y aumentando de nuevo hacia la parte posterior del tiburón.

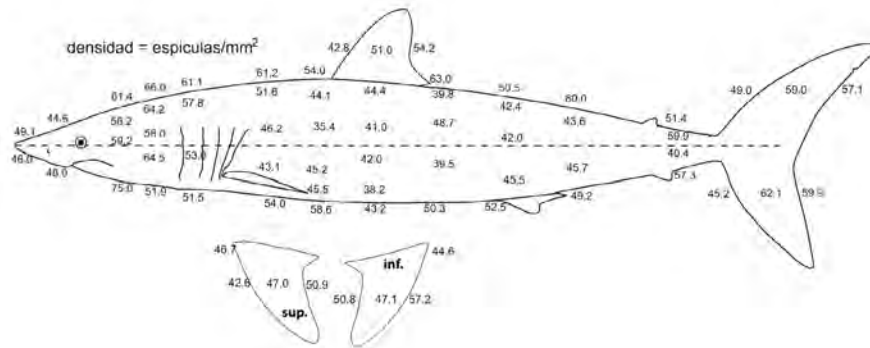


Figura 15. Distribución de la densidad de espículas/ $\text{mm}^2$  en las diferentes zonas del tiburón.

La aleta dorsal y la aleta pectoral en su parte superior presentan un patrón de gradación similar y muy marcado. En ambas aletas la menor densidad se encuentra en la zona más próxima del borde de ataque de la aleta y aumenta progresivamente hacia el borde de fuga. En cambio en la parte inferior de la aleta pectoral la mayor densidad se encuentra en el borde de ataque, siendo los valores de la zona central y del borde de fuga muy similares a los de la zona superior.

En el caso la aleta caudal, tanto en la mitad superior como en la inferior, la mayor densidad se encuentra en la zona central de la aleta, disminuyendo hacia los extremos y encontrándose la menor densidad en la zona próxima al borde de fuga.

El estudio de la orientación de las espículas ha permitido caracterizar que existe una gran variabilidad en la orientación angular a lo largo del cuerpo del tiburón respecto al eje longitudinal. La orientación antero-posterior de las espículas es común a todos los puntos de piel muestreados pero el ángulo parece variar en relación a la dirección dominante del flujo de agua sobre cada zona concreta. Esto último, sin embargo, deberá ser demostrado mediante un estudio que correlacione los parámetros hidrodinámicos estudiados en el modelo CFD con las variaciones angulares descritas en cada zona. Puede observarse una representación visual de la orientación de los ejes longitudinales sobre las vistas del perfil, dorsal y ventral del marrajo en la figura 16.

En esta figura, la vista de perfil muestra variaciones en función de la zona del cuerpo. En la línea L2 las espículas se orientan hacia el centro del cuerpo en la zona anterior pero progresivamente giran hacia una posición angular neutra en el centro y hacia el exterior en la parte final posterior. En la Línea L3, si excep-

tuamos la zona de la cabeza y la parte final posterior, el ángulo que forman las espículas en relación al eje referencia es muy estrecho, con un arco entre  $2^\circ$  y  $348^\circ$ . El ángulo de las espículas en la línea central L5 y la ventral superior (L6) está perfectamente alineado con el eje de referencia, con una amplitud de arco de solo  $2^\circ$  y  $4^\circ$  en toda su longitud respectivamente.

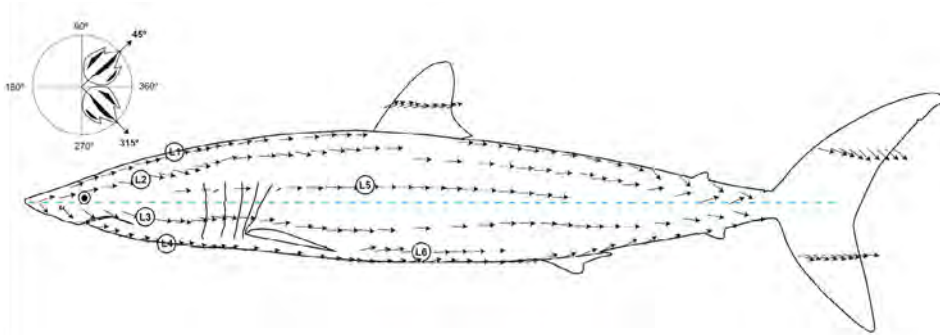


Figura 16. Representación de la orientación angular de las espículas en relación al eje de referencia que pasa por la nariz-quilla.

En las aletas el análisis limitado de muestras indica que en la aleta dorsal el ángulo formado por las espículas en el borde de ataque ( $25^\circ$ ) es mayor que en la zona central ( $10^\circ$ ) y que en el borde de fuga ( $17^\circ$ ).

En la aleta caudal superior el ángulo oscila entre  $315^\circ$  y  $346^\circ$  desde el borde de ataque al de fuga. En la caudal inferior el patrón es similar pero el ángulo es ligeramente mayor y más uniforme en toda la longitud muestreada.

En la vista dorsal en la línea L1 que discurre sobre la parte superior del marrajo la orientación de las espículas en la zona anterior oscila claramente hacia el centro del cuerpo, y con un ángulo pequeño hasta la altura de la aleta pélvica (arco de  $0^\circ$  a  $20^\circ$ ), a partir de la cual el ángulo aumenta considerablemente (arco entre  $339^\circ$  y  $330^\circ$ ).

En la vista ventral (línea L4) la orientación de las espículas en todo el recorrido antero posterior va desde el centro al exterior con diferentes ángulos dependiendo de la zona.

#### *Descripción de los parámetros hidrodinámicos*

Para todos los casos se mantiene la velocidad de natación constante de forma que sólo varía la altura de la rugosidad (o de la espícula).

### *Coefficiente de Arrastre*

La figura 17A muestra el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) en la dirección del flujo en función de la altura de espícula. Como puede apreciarse, el coeficiente de arrastre aumenta al aumentar la altura de la espícula de acuerdo a los tres casos definidos anteriormente: caso 1, caso 2 y caso 3 respectivamente.

### *Coefficiente de Sustentación*

La figura 17B muestra el coeficiente de sustentación ( $C_l$ ) en la dirección perpendicular al flujo, en función de la altura de la espícula media. Se puede observar la disminución del efecto de sustentación cuando aumenta la altura de la espícula, lo cual se explica por la rotura de la capa límite que es una de las responsables de la sustentación del animal.

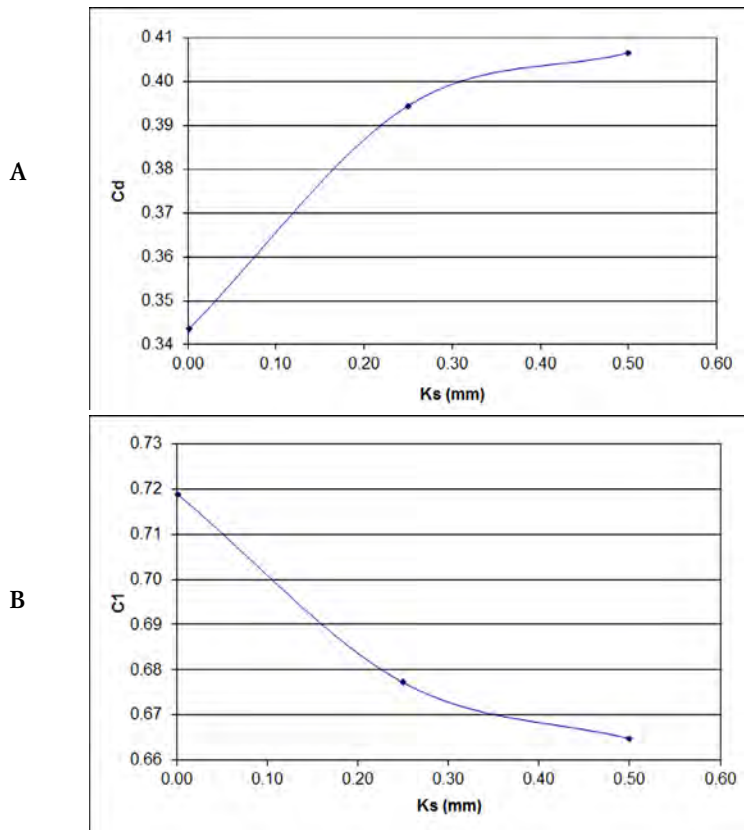


Figura 17. A) Coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) en función de la altura de rugosidad y B) Coeficiente de sustentación ( $C_l$ ) en la dirección perpendicular del flujo.

### *Coefficiente de fricción superficial*

El coeficiente de fricción superficial ( $C_{f/2}$ ), tal y como ha sido definido anteriormente, es el que caracteriza la energía necesaria para el avance del animal en el medio marino. La figura 18 muestra precisamente la distribución del coeficiente de fricción superficial a lo largo del perfil de tiburón para las tres rugosidades estudiadas. Se observan picos en las zonas de las aletas pectorales, dorsal y trasera que ofrecen una mayor resistencia al flujo, por lo tanto una fricción mayor. Las diferencias no son apreciables entre los dos últimos casos.

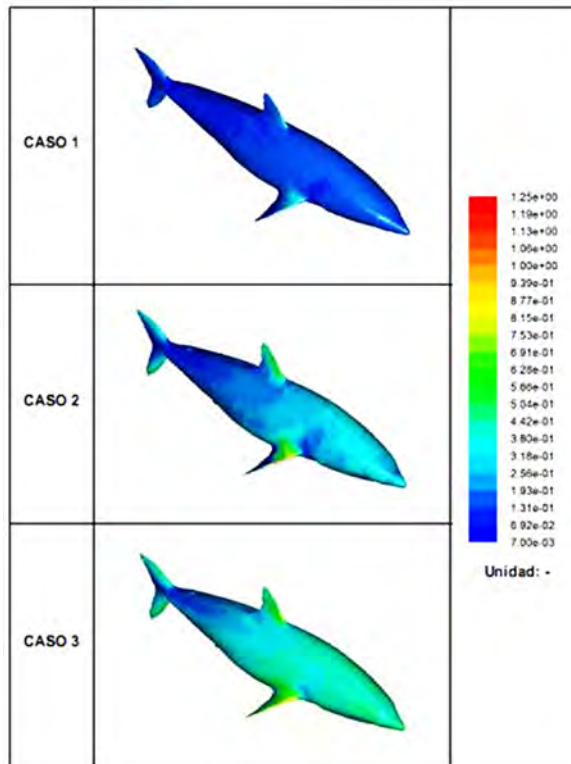


Figura 18. Tabla Comparativa del coeficiente de fricción superficial.

### *Campos de velocidades*

En la figura 19 se muestra cómo la velocidad del fluido que rodea al tiburón disminuye conforme aumenta la altura de la espícula. Ésta, a su vez, hace que aumenten las recirculaciones en la parte posterior de las aletas pectorales, tal y como se ha

señalado para el de mayor altura de espículas.

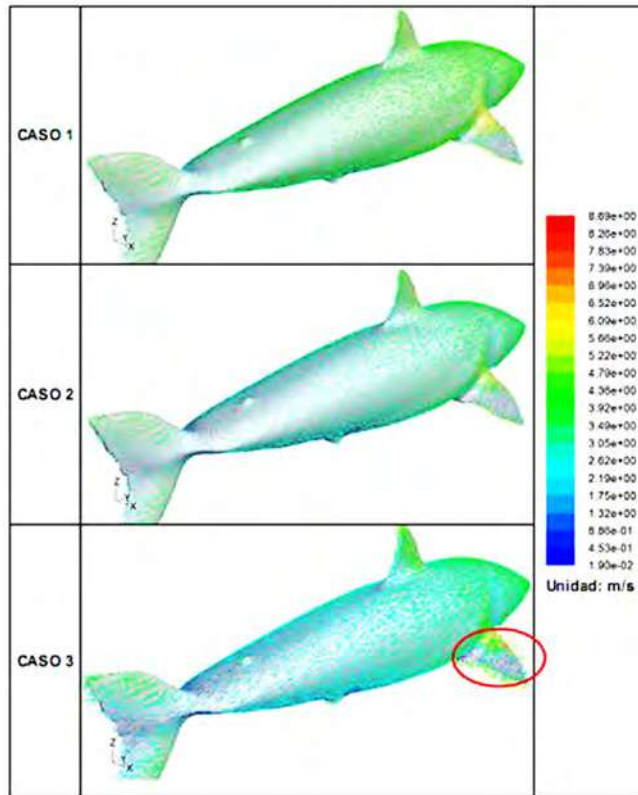


Figura 19. Comparativa de velocidad del agua sobre el perfil.

## Conclusiones

Las siguientes conclusiones de este trabajo se detallan a continuación:

- Dentro de un mismo patrón de diseño, la morfología y, en menor medida, el tamaño de las espículas ha mostrado una enorme variabilidad dependiendo de la zona del cuerpo. Esta gran variabilidad parece estar relacionada con las cargas hidrodinámicas. Por ejemplo, la zona del hocico presenta espículas grandes, redondas y sin estriación anteroposterior mientras que en la zona lateral superior las espículas son de mayor tamaño y menor estriación. Las espículas de la zona anterior a la aleta caudal presentan las menores dimensiones de todo el transecto lateral. En la zona lateral inferior las espículas presentan un

tamaño más reducido aunque con una estriación muy marcada. En el caso de la aleta dorsal, existen diferencias entre el borde de ataque y la zona posterior, siendo mayores las primeras que además poseen una estriación débil. En la aleta pectoral las espículas del borde de ataque de la zona dorsal son más grandes y redondeadas que las de la zona de fuga. En la zona ventral de la aleta pectoral las espículas son más pequeñas que las de la zona dorsal.

- La densidad de espículas analizada en las muestras de piel muestra una zonación en sentido longitudinal y vertical a lo largo del cuerpo del tiburón. La densidad disminuye desde la cabeza hacia el centro del tiburón y aumenta de nuevo en la zona caudal. En sentido vertical existe una mayor densidad de espículas en la zona superior e inferior que en el centro.
- La orientación de las espículas respecto al eje longitudinal es muy variable según los ejes analizados. Aún con el limitado número de muestras utilizadas se ha conseguido caracterizar el patrón general de orientación en base a los ejes longitudinales descritos. La laboriosidad de este tipo de análisis aconseja centrarse en zonas concretas de pequeño tamaño y de alta significación con el objeto de obtener una caracterización completa de las zonas más interesantes desde el punto de vista hidrodinámico (aleta dorsal).
- El coeficiente de arrastre aumenta conforme aumenta la altura de la espícula y el coeficiente de sustentación disminuye conforme aumenta la rugosidad. Sin embargo, al duplicar el tamaño de la espícula desde 0.25 mm a 0.5 mm no se observan grandes cambios.
- El coeficiente de fricción superficial aumenta con la altura de la espícula. El tamaño de la misma afecta mucho a éste coeficiente además de cualquier protuberancia que sobresalga del cuerpo del tiburón, como aletas pectorales, dorsal y cola. Sin embargo, la media de éste coeficiente se corresponde más o menos en cada caso con el valor de  $k_s$ .
- La velocidad del fluido que rodea al tiburón disminuye conforme aumenta la altura de la espícula o la rugosidad. Ésta, a su vez, hace que aumenten las recirculaciones en la parte posterior de las aletas pectorales.
- De acuerdo a la gran variabilidad encontrada en la morfología y tamaño y el hecho de que la densidad y orientación de las espículas tengan un patrón reconocible en cada zona del cuerpo, se presupone que estos parámetros “biológicos” están relacionados con los parámetros hidrodinámicos estudiados en el modelo CFD y son los responsables de la alta eficiencia hidrodinámica del tiburón.

Los resultados obtenidos aconsejan profundizar en el estudio aplicando las metodologías ya ensayadas en zonas concretas de alto interés hidrodinámico para obtener conclusiones directas sobre los mecanismos implicados en la alta eficiencia hi-

drodinámica que muestran esta especie de tiburones. En concreto, sería deseable estudiar cómo las variaciones de los parámetros biológicos de densidad, tamaño y orientación de las espículas de la piel afectan a los parámetros hidrodinámicos (turbulencia, coeficientes de arrastre y sustentación) en modelos de aletas y cascos de barcos mediante modelos CFD. Los resultados permitirían establecer una comparación del ahorro y la eficiencia energética entre embarcaciones con cascos de superficie lisa y otros que simulen un recubrimiento laminar en el casco que imiten las características hidrodinámicas de la piel del tiburón.

#### NOMENCLATURA

CFD	Computational Fluid Dynamics
$C_d$	Coefficiente de Arrastre
$C_l$	Coefficiente de Sustentación
$C_{f/2}$	Coefficiente de fricción superficial
Re	Número de Reynolds
$G_k$	Generación de energía cinética turbulenta
$k$	Energía cinética turbulenta
$\varepsilon$	Ratio de disipación turbulenta
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Números de Prandtl de energía y disipación
$C_s$	Roughness Constant
$C_V$	Coefficiente de viscosidad turbulenta
$K_s$	Roughness Height
$y_p^+$	Espesor adimensional de la subcapa laminar
$\rho$	Densidad promedio del agua del mar ( $\approx 1,000 \text{ kg m}^{-3}$ )
$\mu$	Viscosidad dinámica promedio del agua del mar ( $= 1.52 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )
$F_d$	Componente de la fuerza en dirección al flujo
$A$	Área de referencia
$F_l$	Fuerza de sustentación en dirección perpendicular al flujo
$\tau_w$	Tensor local de tensiones de las paredes



## BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS® Academic Research (2013) Release 15.0, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- BALL, P. (1999). Shark skin and other solutions. *Nature*, 400, 507-508.
- BECHERT, D. W., BRUSE, M., HAGE, W., VAN DER HOEVEN, J. G. T. & HOPPE, G. (1997). Experiments on drag reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, 338, 59-87.
- BECHERT, D. W., BRUSE, M., & HAGE, W. (2000). Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin. *Experiments in Fluids*, 28, 403-412.
- BRADY, R. F. (2000). No more tin. What now for fouling control? *Journal of Protective Coatings and Linings*, 14, 42-48. Obtenido de <http://brennan.mse.ufl.edu/research-areas/antifouling/> (consultado en Oct. 2017).
- BRIAN, D., & BHARAT, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368, 4775-4806.
- BRITT, R. (2005). *Fake Shark Skin Could Make Navy Fleet Faster*. Obtenido de [http://www.livescience.com/technology/050715\\_shark\\_skin.html](http://www.livescience.com/technology/050715_shark_skin.html) (consultado en Sept. 2017).
- CALLOW, M. E.; JENNINGS, A.R.; BRENNAN, A.B. (2002). Microtopographic cues for settlement of zoospores of the green fouling alga *Enteromorpha*. *Biofouling*, 18(3), 237-245.
- CARLSON, J., GHAHEY, S., MORAN, S., ANH TRAN, C. & KAPLAN, D.L. (2006). Biological Materials in Engineering Mechanisms. In Yoseph Bar-Cohen (Ed.). *Biomimetics: Biologically inspired technologies* (pp. 365-380). Boca Ratón: Taylor & Francis CRC Press.
- COMPAGNO, L. J. V. (1984). FAO Species Catalogue. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of sharks species know to date. *FAO Fisheries Synopsis*, 125, 4(1), 650-654.
- HOIPKEMEIER-WILSON, L., SCHUMACHER, J. F., CARMAN, M. L., GIBSON, A. L., FEINBERG, A. W., CALLOW, M. E., FINLAY, J. A., CALLOW, J. A., & BRENNAN, A. B. (2004). Antifouling Potential of Lubricious, Micro-engineered, PDMS Elastomers against Zoospores of the Green Fouling Alga *Ulva* (*Enteromorpha*). *Biofouling*, 20(1), 53-63.
- LEE, S-J., LIM, H-C., HAN, M. & LEE, S. S. (2005). Flow control of circular cylinder with a V-grooved micro-riblet film. *Fluid Dynamics Research*, 37, 246-266.
- LION, W. W., SHABIR, A., SHIH, T. H. & ZHU, J. (1995). A new k-epsilon eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation. *Computers and Fluids*, 24, 227-238.
- MULLINS, J. (1997). Secrets of a perfect skin. *New Scientist*, 153, 28-31.
- NARESH, M. D., ARUMUGAM, V., & SANJEEVI, R., (1997). Mechanical behaviour of shark skin. *Journal of Bioscience*, 22, 431-437.
- SHENZHEN, B. & B Technology Co. LTD, (2017). <http://www.sharkskincoating.com/>(consultado en Oct. 2017).
- SCHUMACHER, J. F., ALDRED, N., CALLOW, M. E., FINLAY, J. A., CALLOW, J. A., CLARE, A. S., & BRENNAN A. B., (2007). Species-specific engineered antifouling topographies-correlations between the settlement of algal zoospores and barnacle cyprids. *Biofouling*, 23(1), 55-62.
- WU, Y. & CHRISTENSEN, K. T. (2010). Spatial structure of a turbulent boundary layer with irregular surface roughness. *Journal of Fluid Mechanics*, 665, 1-37.