

Grao en Bioloxía

Memoria do Traballo de Fin de Grao

Estudio de las propiedades de la piel del tiburón y de sus aplicaciones biomiméticas

Estudo das propiedades da pel do tiburón e as súas aplicacións biomiméticas

Study on the properties of shark skin and its biomimetic applications



Carolina Vega Fiaño

Curso: 2020 - 2021. Convocatoria: Julio

Directores académicos: Montserrat Domínguez Pérez y Óscar Cabezas Gras



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA y
CIENCIAS DE LA TIERRA

Dña. Montserrat Domínguez Pérez y D. Oscar Cabeza Gras autorizan la presentación del trabajo de fin de grado “**Estudio de las propiedades de la piel del tiburón y de sus aplicaciones biomiméticas**” presentado por **Carolina Vega Fiaño** para su defensa ante el tribunal calificador.

Dra. Montserrat Domínguez Pérez

Dr. Oscar Cabeza Gras

En A Coruña a 21 de julio de 2021

Resumen

En este trabajo se revisa la bibliografía existente relacionada con la piel del tiburón para entender sus propiedades biomiméticas: la reducción del arrastre durante el desplazamiento y la antibioincrustación. Para ello es importante conocer cómo es la estructura de la superficie de su piel, formada por dentículos dérmicos, y cómo estos le confieren dichas propiedades. Finalmente, se hace una revisión de las posibles aplicaciones que pueden surgir gracias a la replicación de superficies similares a la de la piel del tiburón, en ámbitos como el transporte o el textil.

Palabras clave: *piel de tiburón, biomimética, dentículo, riblet, arrastre, antiincrustación.*

Resumo

Neste traballo revísase a bibliografía existente relacionada coa pel do tiburón para entender as súas propiedades biomiméticas: a redución do arrastre durante o desprazamento e a antibioincrustación. Para iso é importante coñecer como é a estrutura da superficie da súa pel, formada por dentículos dérmicos, e como estes lle confiren ditas propiedades. Finalmente, faise unha revisión das posibles aplicacións que poden xurdir grazas á replicación de superficies semellantes as da pel do tiburón, en ámbitos como o transporte ou o textil.

Palabras chave: *pel de tiburón, biomimética, dentículo, riblet, arrastre, antiincrustación.*

Abstract

This paper reviews the existing bibliography related to shark skin in order to understand its biomimetic properties, drag reduction in movement and antibiofouling. To better get the grasp of it, it is important to know what the structure of the skin made up of dermal denticles looks like, and how the denticle morphology has been attributed these properties. Finally, this paper reviews the possible practical applications that may come out by mimicking shark skin surfaces in different fields like fabrics or transportation.

Keywords: *shark skin, biomimetic, denticle, riblet, drag, antibiofouling.*

Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos	9
3. Material y métodos.....	9
4. Resultados y discusión.....	10
4.1. Reducción de arrastre.....	10
4.2. Antiincrustación.....	15
4.3. Aplicaciones.....	18
5. Conclusiones / Conclusións / Conclusions	20
6. Bibliografía.....	23

1. Introducción

Igual que el ser humano ha ido progresando a lo largo de todos estos años, la naturaleza lleva millones de años evolucionando y perfeccionando sus diferentes cualidades, para buscar el mayor rendimiento energético posible y sobrevivir ante las adversidades que la propia naturaleza genera (Bar-Cohen, 2006; Fu et al., 2017; Martin & Bhushan, 2016; Solga et al., 2007; Wegst et al., 2015). Surgen, así, una gran diversidad de especies, cuyos tejidos están compuestos principalmente por proteínas, hidratos de carbono o lípidos (Bar-Cohen, 2006), con los que, además, son capaces de crear una gran variedad de materiales con un alto rendimiento y una complicada arquitectura. (Bhushan, 2009; Sarikaya et al., 2003). Es decir, estos se forman gracias a una enrevesada interacción entre la estructura de la superficie, la morfología y sus propiedades físico químicas (Bhushan, 2009). Todos estos rasgos naturales son realmente interesantes, como pueden ser la superhidrofobicidad, la reducción de arrastre en el flujo de fluido, materiales y fibras con una elevada resistencia mecánica, conservación de la energía, regeneración, etc (Bhushan, 2009).

Si unimos nuestro afán por el conocimiento y el progreso, con las grandes cualidades de la naturaleza, pueden surgir nuevas ideas realmente interesantes y podremos sobrepasar algunos de los límites alcanzados en la tecnología (Solga et al., 2007). Gracias a esta combinación surgió la biomimética, que, según el diccionario Webster (*Biomimetics. In Merriam-Webster.Com, 2021*), se define como “el estudio de la formación, estructura o función de sustancias y materiales producidos biológicamente (como enzimas o seda) y mecanismos y procesos biológicos (como síntesis de proteínas o fotosíntesis) especialmente con el fin de sintetizar productos similares por mecanismos artificiales que imitan los naturales”. Mientras que otros autores, con este término, se refieren al estudio de la estructura y la función de los sistemas y procesos biológicos como inspiración para el diseño sostenible y la ingeniería de materiales y máquinas ((Sullivan & Regan, 2011). En resumen, la biomimética consiste en imitar la biología o la naturaleza (Bar-Cohen, 2006; Fu et al., 2017). Se trata de un campo científico interdisciplinario, es decir, es aplicable a muchos ámbitos de la ciencia y la tecnología como pueden ser la biología, la física o la ingeniería, entre otras (Pu et al., 2017). De esta forma, la biomimética, ha ayudado a los científicos a descubrir nuevas técnicas para obtener diseños de ingeniería innovadores y muy útiles (Martin & Bhushan, 2016; Sarikaya et al., 2003; Sullivan & Regan, 2011), ya sea basándose en el diseño, la función o una combinación de ambas (Carlson et al., 2005). Algunos ejemplos son: la capacidad antiincrustante y la autolimpieza de la hoja de loto, la propiedad antirreflectante de los ojos de las polillas, la autolimpieza de las mariposas, la seda empleada por arañas y gusanos de seda para construir los capullos o para fabricar redes fuertes y funcionales

para atrapar a las presas, la capacidad de los geckos para pegarse a las superficies, etc (Carlson et al., 2005; Martin & Bhushan, 2016).

La naturaleza nos ha proporcionado múltiples ideas que pueden facilitar nuestra vida cotidiana (Bar-Cohen, 2006). La biomimética nos puede ayudar de diferentes maneras a reducir la huella que dejamos, promoviendo la sostenibilidad (Solga et al., 2007). Una de las propuestas para esta reducción es el empleo de superficies superhidrófobas con autolimpieza que se pueden usar en materiales expuestos a la lluvia, para facilitar el arrastre de los contaminantes evitando, así, el empleo de agua corriente para su limpieza. De esta manera podremos ahorrar tanto en energía como agua y evitar el uso de agentes de limpieza (Solga et al., 2007). Además, podemos encontrar varios ejemplos de proyectos novedosos, que se pueden observar en la figura 1, que nos acercan más a la posibilidad de no depender de los combustibles fósiles, como puede ser el edificio Eastgate (figura 1 A), que está basado en dos de las características que se pueden observar en los montículos de *Macrotermes michaelseni*: los principios de flujo inducido y la capacidad térmica. Con esto se consigue una disminución de la energía empleada entre el 17% y el 52%. También, encontramos la Casa 2 del Consejo en Melbourne (figura 1 B), en el que pretendieron imitar los mecanismos de enfriamiento de algunas especies de termitas, reduciendo, así, la energía necesaria en un 85% y el consumo del agua a un 70% en comparación con edificios similares (Zari, 2010).

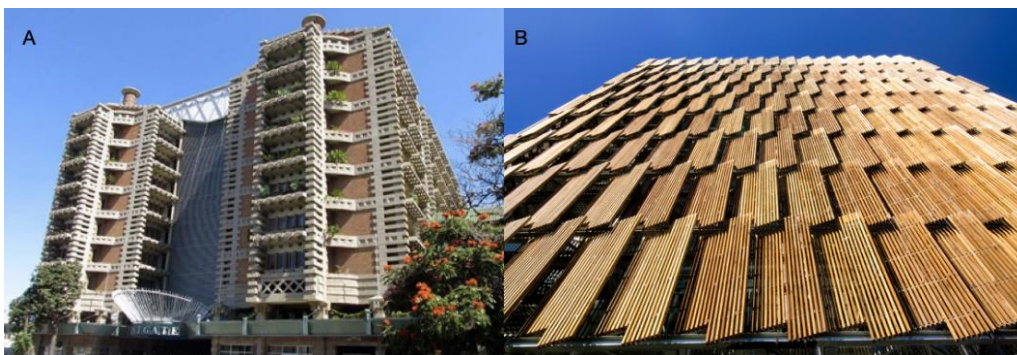


Figura 1. A) Edificio Eastgate. Recuperado el 15/07/2021 de <https://www.clubopenprop.com.ar/actualidad-inmobiliaria/136-9-edificios-que-integran-tecnologia-y-naturaleza-como-ningun-otro>. B) Casa 2 del Consejo en Melbourne. Recuperado el 15/07/2021 de <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-277806/oficinas-del-consejo-ch2-designinc>.

Otra forma de disminuir el consumo de combustibles fósiles, sería la reducción de la resistencia de los diferentes medios de transporte, gracias al ahorro de energía y a la evasión de la liberación de productos químicos (Fu et al., 2017; Pu et al., 2017). Son varios los animales que han servido de inspiración para llevar a cabo esta idea, como por ejemplo el automóvil Bionic, que fue construido usando como fuente de inspiración

las características aerodinámicas de *Ostracion meleagris* (pez cofre), representado en la figura 2. Con este coche se consume el combustible de forma más eficiente y presenta un coeficiente de resistencia aparentemente menor que el resto de coches (Zari, 2010). Otros casos son el pico de pájaros que pertenecen al género Rynchops, que presenta una superficie con riblets que le ayudan a reducir la resistencia a la hora de atrapar peces o crustáceos para alimentarse (Martin & Bhushan, 2016), o la piel de los tiburones (Bhushan, 2009; Martin & Bhushan, 2016), que les permiten desplazarse a elevadas velocidades y con bajo aporte de energía, gracias a que reducen el rozamiento (Bhushan, 2009).

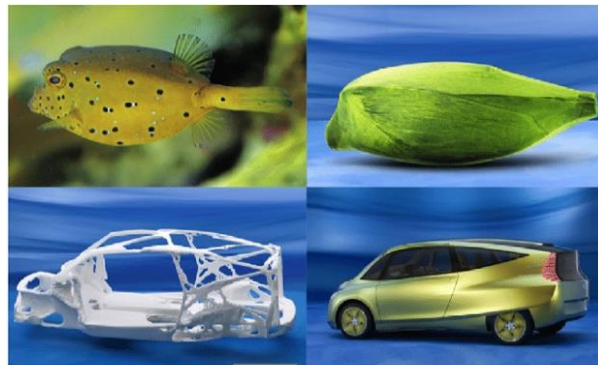


Figura 2. Representación de la adaptación de la estructura del *Ostracion meleagris* para crear el coche Bionic. Recuperado el 15/07/2021 de <https://noticias.coches.com/fotos-de-coches/mercedes-bionic-concept-car-2005/62327>.

En esta recopilación bibliográfica nos centraremos en las cualidades de la piel de los tiburones. Estos animales, que han servido como fuente de inspiración, pertenecen, junto a las rayas, a la subclase de Eslamiobranquios, dentro de la clase Chondrichthyes (peces cartilaginosos) (Sullivan & Regan, 2011). Los tiburones se encuentran en el superorden Selacimorfos, en el que se encuentran 8 órdenes, que representan a los tiburones actuales: Hexanchiformes, Squaliformes, Pristiophoriformes, Squatiniformes, Heterodontiformes, Orectolobiformes, Lamniformes, Carcharhimiformes (Figura 3). Estos órdenes se pueden diferenciar en función de rasgos básicos observables, como puede ser la presencia o ausencia de la aleta anal, el número de hendiduras branquiales, la presencia o ausencia de espinas en las aletas dorsales, la presencia o ausencia de párpados nictitantes o la posición de la boca delante de los ojos (Branco Rodrigues, 2009).

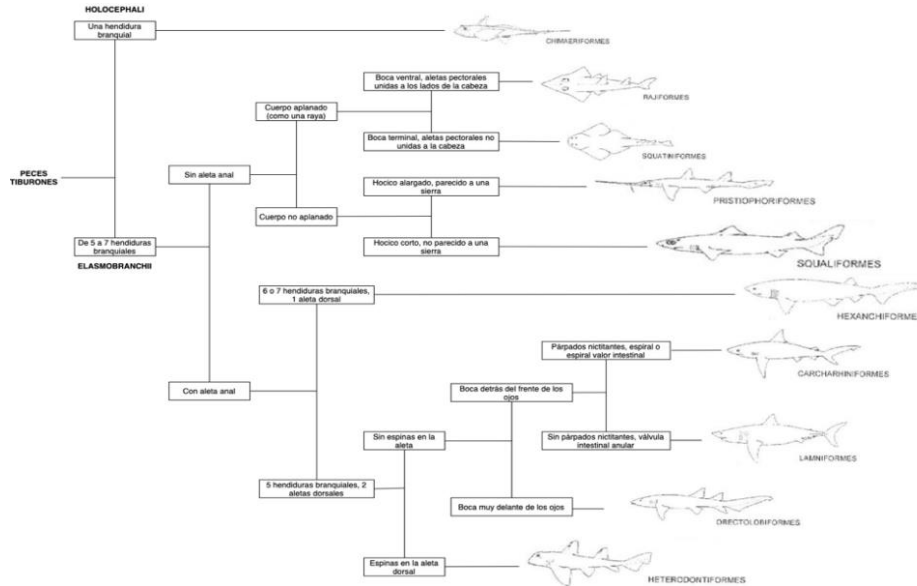


Figura 3. Clasificación de los Eslamiobranquios (Bhushan, 2009).

La mayoría de las especies pertenecientes a los Eslamiobranquios son capaces de mantener la flotabilidad y de desplazarse por el medio acuático con una gran eficiencia (Bhushan, 2009). Este factor sumado a la capacidad antiincrunstante de su piel, han sido el motivo por el que la piel de los tiburones se convirtió en objeto de estudio durante décadas (Pu et al., 2016). Su piel está interconectada con los músculos, que a su vez están conectados con los huesos. Estos músculos producen el empuje para realizar un movimiento ondulatorio, de forma que la piel se acortará y alargará según la curvatura y las fuerzas de transmisión y desplazamiento de la cola. Se trata de un órgano complejo y flexible con una dermis, situada debajo de la epidermis, en la cual se reconocen dos capas diferentes: el estrato superior laxum y el estrato inferior compactum, formado por capas de fibra de colágeno enrolladas helicoidalmente (Lee, 2014).

Como sabemos, la piel del tiburón no es una superficie lisa (Bhushan, 2009; Fu et al., 2017; Pu et al., 2017; Sullivan & Regan, 2011), sino que tiene unas escamas placoides microscópicas compuestas por dentina y esmalte (Carlson et al., 2005; Lee, 2014; Sullivan & Regan, 2011; Wen et al., 2014). El centro de la dentina está formado por apatita, lo que proporciona dureza y resistencia (Lee, 2014). Estas pequeñas escamas, denominadas dentículos dérmicos, se encuentran dispuestas individualmente a lo largo de gran parte de la superficie de la piel de los tiburones (Bhushan, 2009; Fu et al., 2017; Lee, 2014; Pu et al., 2016, 2017; Sullivan & Regan, 2011; Wen et al., 2014) formando una matriz entrelazada (Pu et al., 2016, 2017). Los dentículos dérmicos tienen la base incrustada en la última capa de colágeno de la piel, el estrato compacto, y el extremo contrario, la corona, está expuesta al flujo de agua (Díez et al., 2015; Lee, 2014; Wen et al., 2014). Uniendo ambas partes, se encuentra el pedicelo (Carlson et al., 2005), como

se puede apreciar en la Figura 4. Los dentículos presentan surcos longitudinales entre los riblets (crestas finas y elevadas), que se encuentran alineados de forma paralela a la dirección del flujo local del agua (Bhushan, 2009; Martin & Bhushan, 2016; Pu et al., 2016; Sullivan & Regan, 2011; Wegner & Dumcke, 2017). La piel presenta variaciones en el tamaño y la forma de los dentículos en función del lugar del cuerpo del tiburón que estemos observando, pero, también varían entre las diferentes especies (Díez et al., 2015).

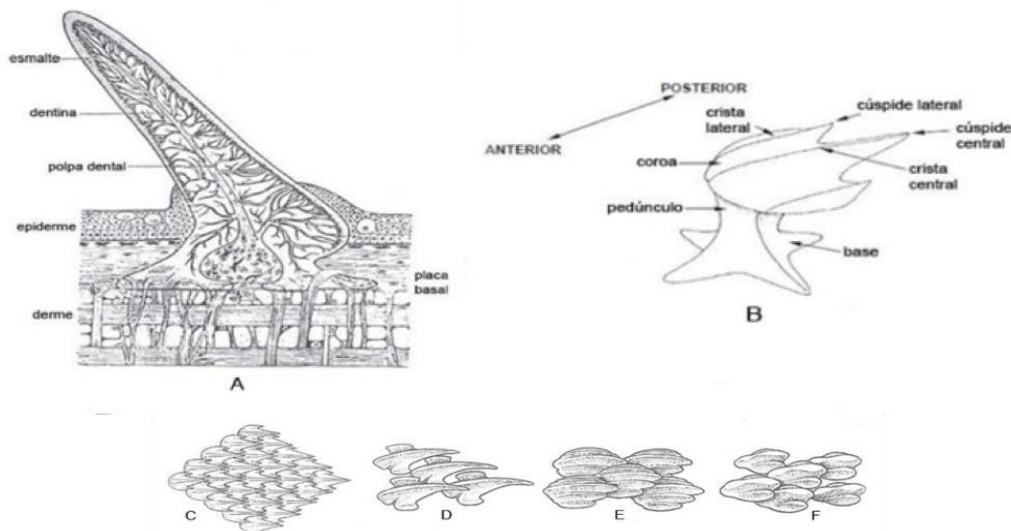


Figura 4. (A) representación de la estructura interna de un dentículo (B) estructura externa. (C), (D), (E) y (F) son ejemplos de tipos de dentículos dérmicos. (Carlson et al., 2005).

En cuanto a la morfología existen dentículos dérmicos romos, festoneados, en forma de pala, en forma de espina, cuchilla y en forma de corazón (Carlson et al., 2005). Algunos autores afirman que las diferentes formas podrían estar relacionadas con el estilo de vida de los tiburones, de tal manera que los que viven en un ambiente rocoso y necesitan protegerse de la abrasión presentan escamas gruesas y lisas, como, por ejemplo, las presentes en el vientre de *Squatina squatina* (pez ángel) (Raschi & Tabit, 1992; Wegner & Dumcke, 2017). En cambio, *Centrophorus granulosus* (quelvacho) y *Heterodontus spp.* combaten la abrasión con dentículos con coronas gruesas y con forma de perilla (Raschi & Tabit, 1992). Mientras que, tiburones como *Carcharodon carcharias* (tiburón blanco), que nadan rápidamente, presentan dentículos dérmicos que constan de riblets. En cambio, los tiburones que nadan lentamente, como los tiburones gato, presentan escamas largas y puntiagudas (Wegner & Dumcke, 2017).

Fu y colaboradores simplifican las diferentes morfologías de los dentículos dérmicos según sus formas geométricas, de manera que se encuentran dentículos en forma de V, L, U, \cap o espacio-V, representadas en la figura 5. Las diferencias establecidas entre los

distintos tipos dependen de tres parámetros (representados en la figura 5): h, que se corresponde con la altura del dentículo, s, que determina el espacio entre cada corona, y t, que representa el grosor (Fu et al., 2017).

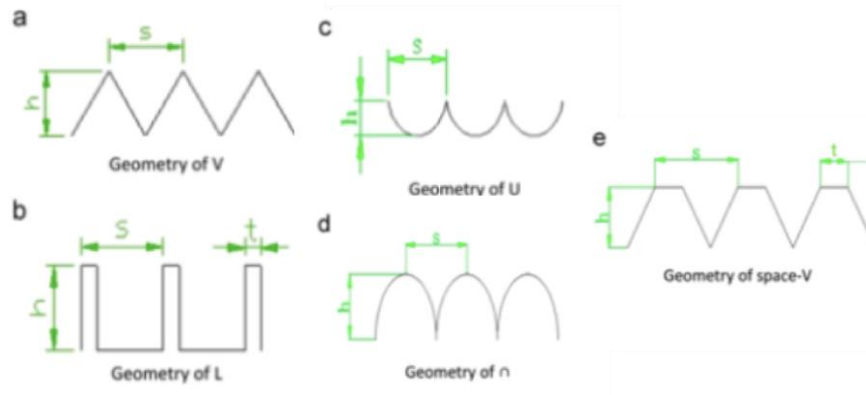


Figura 5. Simplificación de las morfologías de los dentículos dérmicos presentes en la piel de los tiburones (Fu et al., 2017).

Los dentículos dérmicos pueden variar tanto en el diseño, como en la alineación de sus crestas, su distribución en el cuerpo o el tamaño, que a su vez podrá ser diferente según la especie o la zona del cuerpo del tiburón (Domel et al., 2018).

Tabla 1. Valores de densidad, longitud, ancho y ángulo medio de la punta de los dentículos dérmicos presentes en la superficie de la piel de *S. canalicula*, que se dan entre 4 partes del cuerpo diferentes (Sullivan & Regan, 2011).

Localización en la piel	Dentículos/mm ²	Longitud máxima (μm)	Ancho máximo (μm)	Ratio (longitud / ancho)	Ángulo medio de la punta
Cabeza	3,7 ± 1,3	729 ± 201	418 ± 92	1:1,8	27,8° ± 5,2°
Primera aleta dorsal	7,7 ± 1,5	471 ± 77	320 ± 41	1:1,5	39,7° ± 8,4°
Segunda aleta dorsal	19,2 ± 2,0	336 ± 37	234 ± 21	1:1,4	61,5° ± 6,7°
Aleta caudal	17,3 ± 2,6	333 ± 41	244 ± 33	1:1,4	59,1° ± 9,3°

Algunos autores (Sullivan & Regan, 2011) midieron la densidad (dentículos por superficie) de los dentículos, la longitud, la anchura y el ángulo medio del dentículo con respecto a la piel del tiburón, para poder determinar que se produce una variación tanto

en el tamaño como en la forma de los dentículos en un mismo individuo de *S. canalicula* (también conocido como pintarroja), tal y como se puede apreciar en la tabla 1.

Estos mismos autores muestran una imagen realizada con un microscopio electrónico de barrido (SEM), como se puede ver en la Figura 6 (a), en la que se aprecia claramente la variación de la morfología de los dentículos dérmicos en función de la localización en *S. canalicula*, con lo que concluyeron que la relación longitud-anchura no es estable, sino que varía, produciéndose un alargamiento de los dentículos según se aproximaban a la cabeza. En la figura 6 (b) se distinguen dentículos dérmicos más pequeños en aletas y branquias, mientras que en el resto del cuerpo estos son más grandes, lo que también sucede en *Somniosus microcephalus* (tiburón de Groenlandia, se trata de un tiburón lento) y *Squalus acanthias* (mielga) (Feld et al., 2019). Ciertos autores hallaron variaciones en la longitud de la corona de los dentículos dérmicos de *Scyliorhinus canicula*, de entre 0,3 y 1 mm, con densidades de área de entre 400 y 2000 cm². Si los dentículos presentan una elevada longitud entonces la densidad de área será menor, lo cual comprobaron gracias a la observación con microscopio óptico de *Scyliorhinus canicula* o mediante imágenes SEM en los casos de *Somniosus microcephalus* y *Squalus acanthias* (Feld et al., 2019).

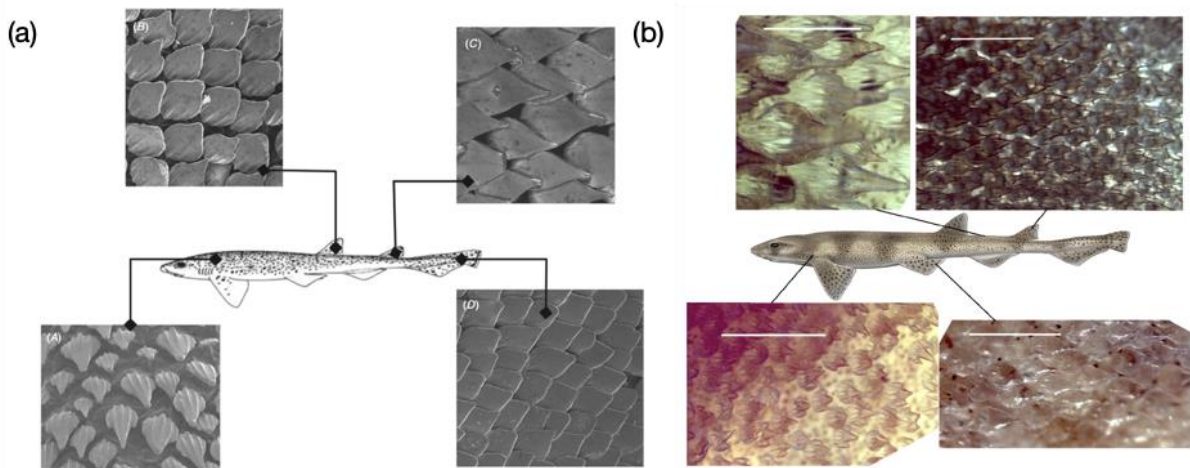


Figura 6. (a) Imagen SEM que muestra los diferentes dentículos dérmicos que presenta un individuo de *S. canicula* a lo largo de su cuerpo (Sullivan & Regan, 2011) (b) Imagen a microscopio donde se distinguen diferentes tipos de dentículos dérmicos a lo largo del cuerpo de *S. canicula* (Feld et al., 2019). Todas las barras de escala miden 1mm.

En la figura 6 se aprecia como en la zona cercana a las branquias de esta especie de tiburón se encuentran dentículos dérmicos tridentados típicos como en la figura 7. Este tipo de escama está compuesta por tres riblets que concurren en la punta (Sullivan & Regan, 2011). Mientras que los presentes en las aletas dorsales y la caudal, a pesar de no ser iguales entre ellos, están formados, aparentemente, por una superficie más lisa.

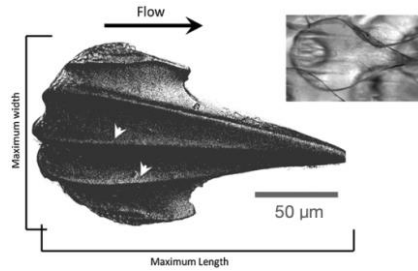


Figura 7. Ejemplo de denticulo dérmico tridentado típico (Sullivan & Regan, 2011).

Otro ejemplo que muestra como la morfología de las escamas placoides de los tiburones varia según su localización en un mismo individuo se comprobó en la especie *Isurus oxyrinchus* (también llamado tiburón mako o marrajo común), un tiburón de natación rápida. La zona ventral y la parte posterior de la superficie dorsal presentan denticulos dérmicos con tres crestas, las cuales eran más visibles que en la nariz y el borde de ataque, con una apariencia bastante más lisa, bordes romos y su superficie era más redondeada y plana (Díez et al., 2015).

Pero estas diferencias no solo se producen según la zona del cuerpo a la que nos refiramos, sino que durante la ontogénesis los denticulos dérmicos van aumentando en número (Carlson et al., 2005) y, además, pueden ir variando su complejidad y su tamaño, como se muestra en la Tabla 2 (Raschi & Tabit, 1992):

Tabla 2. Variación ontogénica (en el eje vertical) y regional (eje horizontal) de los denticulos dérmicos de *Heterodontus spp* ((Raschi & Tabit, 1992).

		Regiones dentro del subcampo de denticula dérmica						
		(1) Bordes de las aletas	(2a) Borde interior de dorsales	(2b) Crestas de los ojos	(3) Superficie del cuerpo	(4) Hocico	(5) Cavidad de la boca	
Adulto	Longitud del cuerpo							1 mm
	500							
Joven	400							1 mm
	300							
Embrión	200							1 mm
							No hay denticulos	

En *Heterodontus spp* se aprecia como se producen cambios importantes en el tamaño y la complejidad de los denticulos a medida que un individuo joven adaptado a la vida en fondos de barro va modificando su estancia a la de fondos rocosos, a la vez que sus

dentículos se van haciendo cada vez más grandes, cambiando su función (Raschi & Tabit, 1992).

La morfología de los dentículos dérmicos también varía según la especie, dependiendo de su función, que puede ser la reducción de arrastre, la resistencia a la abrasión, la defensa o la bioluminiscencia. De tal forma, los tiburones demersales que habitan cerca de zonas rocosas presentarán escamas más gruesas y lisas, como por ejemplo *Squatina squatina* o *Centrophorus granulosus*. Mientras que los que frecuentan fondos arenosos y/o fangosos tendrán dentículos en forma de espigas con una función defensiva contra los ectoparásitos. Generalmente, se trata de tiburones sedentarios como *Squatina squatina* o *Somniosus microcephalus*. En el caso de tener una función bioluminiscente podemos encontrar cuatro tipos diferentes de dentículos, los cuales son únicos y solo se encuentran en algunos representantes de la familia de los etmoptéridos, como por ejemplo *Etmopterus spinax* (la gata de mar) o *Centroscyllium fabricii* (o tollo negro). La función más analizada es la reducción del rozamiento y sus propiedades antiincrustantes, como veremos más adelante (Raschi & Tabit, 1992). Los principales dentículos que cumplen esta función presentan crestas ordenadas longitudinalmente en la superficie de la corona, lo que favorece una canalización del flujo de agua (Raschi & Tabit, 1992), como es el caso de los dentículos tridentados típicos. Proporciona a los tiburones que los presentan una mejora en el rendimiento de la natación, ya que les permite nadar más rápido empleando la misma cantidad de energía, como es el caso de *Isurus oxyrinchus* y *Carcharhinus falciformis* (o tiburón sedoso), dos tiburones de natación rápida (Wegner & Dumcke, 2017).

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Analizar la bibliografía existente relacionada tanto con las características como con las propiedades de la piel del tiburón.
- Conocer las peculiaridades presentes en su superficie y los beneficios que proporcionan.
- Descubrir las posibles aplicaciones que surgen con la replicación biomimética de su piel.

3. Material y métodos

Para obtener la información necesaria, con la intención de cumplir con los objetivos, se recurrió a las siguientes bases de datos: Web of science, Scopus y Google scholar.

Primero se realizó una búsqueda más general empleando palabras como: “shark”, “biomimetic”, “shark skin” o “riblet”. Posteriormente, se realizó una búsqueda más minuciosa buscando: “biomimetic shark skin”, “shark skin applications”, “dermal denticles” o “fluid drag reduction shark skin”. La última fecha de consulta fue el día 13/07/2021.

A la hora de elegir que artículos iban a ser seleccionados se aplicaron una serie de criterios, quedando únicamente 25 artículos que contenían información acerca de:

- La biomimética en términos generales.
- Las propiedades biomiméticas de la piel del tiburón.
- Los distintos tipos de dentículos dérmicos presentes en la superficie de la piel de los tiburones.
- La acción del flujo de agua sobre una superficie con dentículos.
- Las aplicaciones de las réplicas de dentículos dérmicos.

4. Resultados y discusión

El interés por la piel de los tiburones surgió gracias al trabajo de Wolf-Ernst Reif en 1970, donde se menciona la propiedad más destacada que producen sus escamas placoides, la reducción de la resistencia al fujo (Feld et al., 2019).

Hoy en día, son muchos los estudios que tratan de determinar cómo poder replicar la piel del tiburón con la finalidad de beneficiarse de todas sus cualidades. Las diversas peculiaridades de estos animales, como ya se ha mencionado en la introducción, se deben a la presencia de los dentículos dérmicos, que debido a sus complejas configuraciones y geometrías tridimensionales presentan capacidades de reducción de arrastre, defensa, antiincrustación, resistencia a la abrasión y bioluminiscencia (Du Clos et al., 2018; Feld et al., 2019; Fu et al., 2017; Pu et al., 2016; Sullivan & Regan, 2011).

4.1. Reducción de arrastre

Uno de los grandes impedimentos para el movimiento de un objeto en el seno de un fluido es el rozamiento (Bhushan, 2009). A priori, las superficies rugosas producen un aumento de la resistencia (Carlson et al., 2005), pero en el caso de los tiburones reducen las fuerzas de arrastre durante la locomoción (Wen et al., 2014). Su rugosidad se debe a la presencia de los dentículos dérmicos, que canalizan el agua por los surcos situados

entre las crestas (Carlson et al., 2005), provocando que esta fluya de forma muy eficiente sobre la superficie del tiburón (Bhushan, 2009).

El arrastre, o resistencia, surge de la fricción que tiene lugar entre un objeto y el fluido por el que se mueve. Para comprender los beneficios de los dentículos dérmicos es importante conocer previamente el efecto de los fluidos durante el desplazamiento. Dentro del arrastre de un fluido encontramos dos formas, arrastre por presión y arrastre por fricción (Fu et al., 2017). El arrastre por presión se corresponde con la energía necesaria para que un fluido se mueva desde la parte delantera de un objeto que se encuentra en el flujo a la parte trasera. El efecto de esta presión se puede reducir con formas aerodinámicas. En cambio, el arrastre por fricción está causado por las interacciones entre el fluido y una superficie paralela al flujo y la atracción entre las moléculas del fluido (Dean & Bhushan, 2010; Lee, 2014; Wegner & Dumcke, 2017).

Existen dos tipos de flujos dinámicos, como se puede distinguir en la figura 8:

- Laminar: el fluido se mueve en una dirección, de forma que las partículas del fluido podrán moverse a diferentes velocidades en las distintas capas, pero no se mezclan.
- Turbulento: las partículas del fluido cambian constantemente de posición y velocidad, por lo que se produce un gasto extra de energía. Existen flujos fluctuantes en direcciones diferentes a la principal, lo cual causa remolinos en las capas (Wegner & Dumcke, 2017).

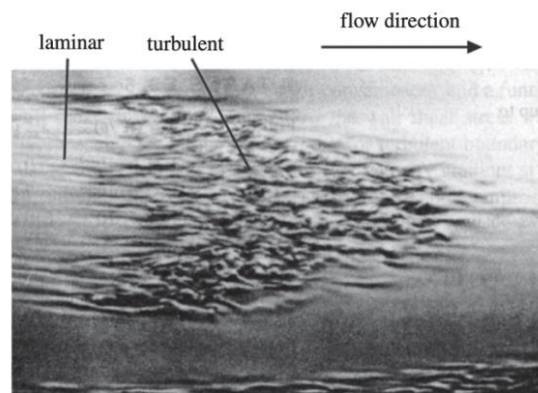


Figura 8. Transición entre un flujo laminar y un flujo turbulento sobre una superficie plana (Dean & Bhushan, 2010).

En la transición entre los dos tipos de flujo las moléculas de fluido se mueven de forma rotatoria y mediante movimientos cruzados, de forma que se mantiene una velocidad promedio en la dirección del flujo (Dean & Bhushan, 2010).

Se puede determinar el tipo de flujo mediante un parámetro adimensional, el número de Reynolds (Re) (Liu et al., 2019), que establece la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en un flujo dado (Dean & Bhushan, 2010):

$$Re = \rho v D / \eta \quad Ec (1)$$

En donde ρ es la densidad del fluido, v la velocidad, D el diámetro de la tubería y η la viscosidad dinámica. Si el flujo circula sobre una placa plana entonces:

$$Re = \rho v L / \eta \quad Ec (2)$$

En este caso L es la longitud de la placa (Dean & Bhushan, 2010).

Cuanto más bajo es el valor Re más bajo es el flujo de un fluido (Liu et al., 2019). Coincidiendo la transición entre el flujo laminar y el turbulento con valores de Re alrededor 3.000 si se trata del flujo en una tubería o de 500.000 en el caso de una placa lisa (Dean & Bhushan, 2010).

Debido a la fricción, las partículas de fluido en contacto con la superficie del cuerpo no se mueven con respecto al mismo, mientras que las moléculas de fluido más alejadas se mueven de forma suave alrededor del cuerpo. Entre ambas está la capa límite turbulenta, donde se produce la resistencia al movimiento (Wegner & Dumcke, 2017), la cual puede presentar una mayor resistencia que una capa límite laminar (Fu et al., 2017), pudiendo exponer el menor esfuerzo de pared posible (Bechert et al., 2000). La capa límite es la región donde se efectúa la transición entre las velocidades del flujo y la del objeto, que van desde cero hasta un valor del 99% de la velocidad de del flujo externo (Gherardelli, 2007).

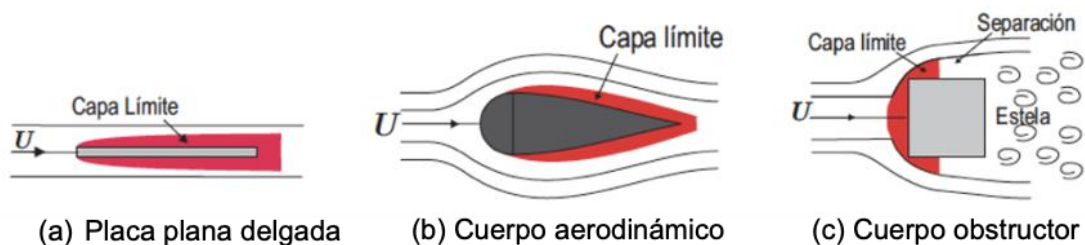


Figura 9. Diferentes representaciones de la capa límite según el objeto que se desplaza en el flujo (Gherardelli, 2007).

La fuerza de rozamiento en un régimen turbulento se puede calcular gracias a la ecuación de Newton de la que se obtiene el valor de la fuerza de resistencia (R) al avance que sufre un cuerpo al desplazarse por un fluido para velocidades tal que el número de Reynolds sea mayor que 1 (Catalá de Alemany, 1988).

Suponiendo un cilindro de base S que avanza a una velocidad por el fluido que presenta una densidad (ρ), que en un tiempo (t) desplaza de su camino a la masa de fluido que ocupa un volumen (V)

$$V = S \cdot v \cdot t \quad \text{Ec (3)}$$

De valor:

$$m = S \cdot v \cdot t \cdot \rho \quad \text{Ec (4)}$$

Para eso se necesita relacionar a dicha masa con la energía cinética:

$$Ec = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v^3 \cdot t \cdot \rho \quad \text{Ec (5)}$$

Ya que hay que desplazarla a la propiedad del cilindro, realizando un trabajo que seguirá la siguiente expresión:

$$W = R \cdot e = R \cdot v \cdot t \quad \text{Ec (6)}$$

Venciendo a la fuerza de rozamiento en el trayecto:

$$e = v \cdot t \quad \text{Ec (7)}$$

Al igualar estas dos últimas expresiones resulta:

$$R = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v^2 \cdot \rho \quad \text{Ec (8)}$$

En el caso de que el cuerpo sea de una forma diferente el valor de la fuerza será mayor cuanto más elevado sea su coeficiente de forma (K) (Catalá de Alemany, 1988):

$$R = \frac{1}{2} \cdot K \cdot S \cdot v^2 \cdot \rho \quad \text{Ec (9)}$$

A pesar de que, por regla general, las superficies rugosas aumentan la resistencia al movimiento, la superficie de la piel del tiburón la reduce gracias a que presenta unas microestructuras, los denticulos dérmicos, que controlan los vórtices turbulentos, provocando que estos tengan lugar dentro de la capa límite reduciendo el rozamiento. Los

vórtices son áreas de baja presión, que presentan en su núcleo el valor de presión mínimo (Oeffner & Lauder, 2012; Raschi & Tabit, 1992; Fu et al., 2017). También es importante el tipo de flujo que actúa, ya que se ha demostrado que los dentículos dérmicos reducen la resistencia únicamente si se encuentran en un flujo turbulento. En el caso de que se encuentren sometidos al efecto de un flujo laminar, el arrastre aumenta al aumentar el área superficial debido a la rugosidad (Fu et al., 2017).

Esto se debe a que los dentículos dérmicos son capaces de modificar las características de la capa límite del flujo contiguo al cuerpo (Domel et al., 2018). Durante la natación rápida o aceleraciones en ráfaga presentan un número de Reynolds relativamente alto (Bhushan, 2009; Oeffner & Lauder, 2012), con lo que surge un flujo turbulento (Bhushan, 2009). Una capa límite turbulenta produce una mayor resistencia que una laminar, por lo que una solución para reducir la resistencia es romper la transición de una capa a otra (Fu et al., 2017). Una superficie que presenta dentículos dérmicos reduce el esfuerzo cortante de la pared en comparación con una superficie lisa (Bechert et al., 2000), ya que alteran el flujo que circula sobre ellos (Oeffner & Lauder, 2012), evitando que los vórtices se encuentren en contacto directo con la superficie, que son los responsables de los grandes valores de esfuerzos de corte y de arrastre (Martin & Bhushan, 2016).

Los dentículos dérmicos consiguen que los vórtices (vórtices primarios) que se forman sobre su superficie permanezcan sobre sus riblets, de forma que únicamente se encuentran en contacto con las puntas de las crestas donde se experimentan altos valores de tensión de corte. En cambio, en la zona de los surcos, el fluido fluye a baja velocidad generando bajas tensiones de corte en la mayoría de la superficie. En ocasiones se producen intrusiones de vórtices, denominados secundarios, de manera transitoria, pero en este caso el aumento del esfuerzo cortante es bajo debido a las bajas velocidades de flujo. Esta diferencia en los valores de tensión de corte se debe a que, al conseguir alejar los vórtices del contacto directo con la piel, las fluctuaciones de velocidad de la corriente transversal que fluye por los surcos de los dentículos son mucho más bajas que las fluctuaciones de velocidad que surgen en el caso de emplear una placa plana. Esto es una evidencia de que se produce una reducción del rozamiento cerca de la superficie, lo que minimiza el efecto del aumento del área superficial que produce la presencia de los dentículos en el caso de un régimen turbulento (Dean & Bhushan, 2010).

Para que esto se produzca el tamaño de las crestas debe estar limitado a uno lo suficientemente grande como para irrumpir en el flujo laminar creando vórtices, pero lo suficientemente pequeño como para que no se produzca un aumento significativo del área de superficie (Raschi & Tabit, 1992). La altura sería menor a 30 micrómetros, mientras que respecto al espaciado los valores serán de menos de 100 micrómetros

(Raschi & Tabit, 1992). El valor óptimo de ratio entre estos parámetros (altura de riblet y espacio punta a punta) para que se produzca una reducción de la resistencia es 0,5 (Bhushan, 2009). En lo que a la forma de los riblets replicados se refiere, la forma óptima son los riblets en forma de cuchilla, que reducen la resistencia en un 9,9% y presentan un valor de h/s (donde h se corresponde con la altura del dentículo y s con la distancia entre las coronas) de 0,5. Mientras que los festoneados, con un valor de h/s de 0,7, reducen la resistencia un 6,5% y los que presentan forma de diente de sierra lo reducen un 5%, presentando un valor de h/s de 10.

La manera en la que se mueve el material ayuda a mejorar el rendimiento de la natación, por lo que la flexibilidad de la dinámica locomotora es un factor a tener en cuenta. En el caso de un tiburón vivo que se desplaza se producen ondulaciones corporales que pueden erizar las escamas de la superficie de su piel y modificar las características del flujo por el que se mueve, provocando que los vórtices formados durante el desplazamiento se adhieran más cerca de la superficie. Al hacer pruebas con láminas flexibles que presentaban dentículos se produjo una mejora con un promedio de 12,3% en la natación en comparación con las láminas a las que se le había extraído los dentículos. Los resultados obtenidos sugieren que los dentículos dérmicos son capaces de reducir la resistencia aumentando la velocidad (Oeffner & Lauder, 2012; Wen et al., 2014).

4.2. Antiincrustación

Una de las características posiblemente más interesante es el antiincrustación. Es decir, que la piel de los tiburones, gracias a que contiene en su superficie dentículos dérmicos, es capaz de evitar en gran medida el asentamiento de ciertos microorganismos, algas, plantas, pequeños animales o incluso biopelículas (Bhushan, 2009; Fu et al., 2017; Lee, 2014). Esta cualidad resulta interesante para ellos ya que, al tratarse de animales acuáticos, están permanentemente expuestos al posible asentamiento de seres vivos (Lee, 2014).

Existen tres factores que previenen la incrustación de organismos o bioincrustación, en la piel de los tiburones (Bhushan, 2009; Lee, 2014):

- El flujo de agua, ya que este reduce el tiempo de contacto con los organismos contaminantes.
- La rugosidad, debido a que se reduce el área de superficie de contacto para la adhesión.
- El erizado de las escamas dependiente del movimiento del tiburón en el agua.

Los dentículos pueden alterar la profundidad de la capa límite cerca de su superficie, lo que resulta en la formación de vórtices primarios y secundarios. Esto puede influir en la capacidad de los propágulos de ensuciamiento potenciales o de la sedimentación para contactar o adherirse a la superficie del dentículo (Sullivan & Regan, 2011).

(Sullivan & Regan, 2011) seleccionaron muestras de piel sintética de polidimetilsiloxano (PDMS) de las diferentes partes de la superficie de la piel de tiburón, en este caso de *S. canicula*. Tras 14 días sumergidas en un entorno de bajo flujo se produjeron aumentos en la masa total (como se aprecia en la figura 10) en comparación con una superficie lisa de elastómero de polidimetilsiloxano (PDMS) de igual área, que usaron como control. La superficie de piel con menor densidad de dentículos, pero más grandes, presenta una mayor sedimentación que las superficies que contienen un mayor grado de densidad y son más pequeños y, además, permiten un mayor porcentaje de inserción de diatomeas y bacterias como consecuencia de la entrada de luz y la protección ante las fuerzas de corte (Sullivan & Regan, 2011).

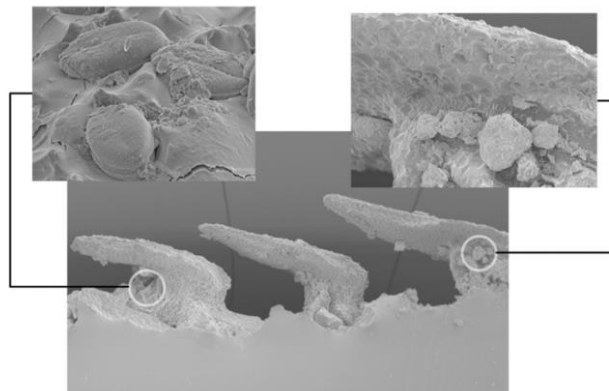


Figura 10. Muestra de una réplica de PDMS de piel de la cabeza de *S. canicula* observada en SEM. Sobre la muestra se observan frústulas de diatomeas y la sedimentación de partículas entre los dentículos dérmicos (Sullivan & Regan, 2011).

En cambio, si el flujo es alto la superficie con una menor densidad y dentículos más grandes presenta un aumento menor de la masa total de incrustaciones en comparación con la muestra sometida a un flujo bajo. En este caso, el control presentará un mayor porcentaje de incrustaciones que la muestra con una menor densidad de dentículos más grandes. Además, concluyen que los dentículos más pequeños que se encuentran más agrupados presentan menor cantidad de contaminación que en el caso de una superficie lisa de la misma área. Es decir, que estas microestructuras de la piel de los tiburones sí promueve la reducción del ensuciamiento de la superficie cuando se desplazan a alta velocidad (Sullivan & Regan, 2011).

La bioincrustación causa estragos en la industria del transporte marítimo (Bhushan, 2009; Fu et al., 2017), ya que reduce la eficiencia, promueve la contaminación e incluso hace que algunos componentes fallen (Sullivan & Regan, 2011). Estos problemas acentuaron la necesidad de un recubrimiento con biocidas o con mecanismos físicos que promoviesen la eliminación, reducción, retraso o prevención de dicho proceso, conocidos como recubrimientos antiincrustantes.

Pero no solo puede prevenir infecciones, sino que según la Organización Marítima Internacional (OMI) establece que los gastos anuales provocados por los organismos bioincrustantes como algas, percebes y limo se establecen en aproximadamente en mil millones de dólares. Esto se debe a que al adherirse a las superficies sumergidas de los barcos se produce un aumento de la resistencia al arrastre, disminuyendo la velocidad y, por lo tanto, un aumento del 40% en el consumo de combustible. Por lo tanto, también puede ayudar a reducir los costes en el gasto de combustible provocado por estos organismos (Lee, 2014).

Usar una superficie texturizada topográficamente, como Sharklet AFTM, favorece la prevención de adhesiones de zoosporas móviles de *Ulla linza* y la formación de biopelículas de *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y otras bacterias (Lee, 2014; Sullivan & Regan, 2011). Esta superficie está compuesta por un patrón de número impar de riblets con diferentes longitudes, intentando imitar a los dentículos dérmicos reales, pero no iguala su topografía y sus dimensiones (Sullivan & Regan, 2011). En un estudio, al comparar la acumulación de *S. aureus* en una superficie lisa y en Sharklet AFTM fabricada con PDMS, se aprecia como el área de cobertura de dicha bacteria se encuentra en una proporción más alta del 40% en una superficie lisa (Lee, 2014). En otro estudio, en el que se analiza el efecto de Sharklet ante *E. Coli*, se emplean tres superficies con diferentes patrones en la superficie mas un control liso. Al comprobar el área en la que se adhiere esta bacteria se aprecia una reducción estadísticamente significativa en las tres muestras con Sharklet, hallando un 47% menos de UFC (unidades formadoras de colonias), un 45% menos del área cubierta, un 80% menos en el tamaño de las colonias y aproximadamente un 81% menos de migración. Gracias a estos datos se puede esperar que superficies como Sharklet ayuden a prevenir infecciones de biopelículas (Lee, 2014).

Se cree que existe una relación entre la morfología de alguno de los dentículos y la recepción sensorial. Estos dentículos se encargan de reorientar el flujo del agua:

- Hacia las aberturas de la fosa nasal. Dentro de la cápsula nasal se produce una turbulencia para mantener el contacto del epitelio sensorial con el agua.
- Fuera de la superficie del globo ocular para reducir la presión externa.

- Lejos de las aberturas de los poros de los canales y ampollas de la línea lateral de Lorenzini.

4.3. Aplicaciones

Una de las finalidades de la replicación de la superficie de la piel del tiburón es crear objetos empleados para el desplazamiento con reducción del rozamiento (Bhushan, 2009), ya que los dentículos dérmicos proporcionan una reducción de la resistencia en los objetos donde la forma dominante de resistencia surge por un flujo turbulento que entra en contacto con la superficie, como por ejemplo en objetos largos con lados relativamente planos. En cambio, en otros objetos como los automóviles, donde la forma dominante es la presión de arrastre o separación del flujo, casi no se apreciaría la influencia de la superficie con riblets (Dean & Bhushan, 2010).

Un claro ejemplo de esta aplicación surge en la década de 1980 cuando, durante la Copa América, a los cascos de algunos botes de competición se les colocó en la superficie una película de vinilo que simulaba los riblets con forma de dientes de sierra (Dean & Bhushan, 2010). Por tanto este tipo de superficies puede ser de mucha ayuda en el ámbito del transporte marítimo, ya no solo por el ahorro en combustible que se produce gracias a la reducción de la resistencia sino, también, a la hora de prevenir la bioincrustación (Bhushan, 2009). En los barcos a los que se les ha proporcionado una superficie que imita la de la piel de los tiburones el crecimiento de incrustaciones durante un año se redujo en un 60%, lo que también facilita su limpieza (Fu et al., 2017).

Este tipo de superficie es interesante para el caso de las aeronaves, ya que el arrastre total que se produce en un avión es en un 48% debido a la fricción. En aviones de prueba como Boeing y Airbus se empleó película de vinilo con riblet, con lo que se observaron claros beneficios a la hora de la reducción de la resistencia, pero todavía no se han utilizado en vuelos comerciales. Debido a ciertos factores ambientales solo se cubre el 70% de la superficie del avión, ya que zonas como las ventanas para evitar perder la visibilidad, los lugares donde polvo y algunos restos contactan con el avión durante el vuelo para evitar la erosión de los riblets o las secciones donde el deshielo, el combustible o el fluido hidráulico entran en contacto con el avión, no se cubren. De esta forma se consigue una reducción de la resistencia del 3%, lo que aporta una reducción en el gasto de combustible de un 3% (Dean & Bhushan, 2010). Un caso específico sería el Airbus 340 comercial, el cual se cubrió con unas láminas transparentes que presenta surcos orientados en la dirección longitudinal, en el que se observó una reducción del rozamiento en un 10% (Bhushan, 2009). Se espera que en 2022 la empresa de aviones Lufthansa despliegue una flota de cargueros con una película superficial fina que imita la piel del tiburón, que les proporciona a estos aviones una reducción del rozamiento de 1%

por ciento, lo que se traduce en ahorros de 3.700 toneladas de queroseno y un poco menos de 11.700 toneladas de emisiones de CO₂.

Estas microestructuras también han servido de inspiración a los fabricantes de trajes de baño y neoprenos, desarrollando nuevos diseños que reducen la resistencia al agua ayudando a mejorar los tiempos de los nadadores en competición o facilitando la navegación de los buceadores. Uno de estos fabricantes ha sido Speedo, que creó una serie de trajes de baño denominados Fastskin, que pueden proporcionar una reducción de la resistencia de hasta un 4% (Carlson et al., 2005). Los riblets que se encuentran en este tipo de tejido se asemejan a los riblets de hoja ancha con pequeñas ranuras en su superficie. Los riblets más grandes se forman por un patrón de macrotejido, mientras que los pequeños son creados por hebras individuales alineadas con los macro-riblets, tal y como se muestra en la figura 11 (Dean & Bhushan, 2010).

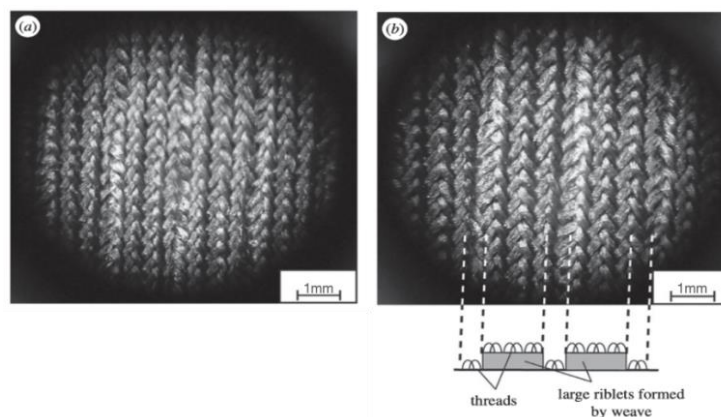


Figura 11. Imágenes de la estructura riblet de un bañador Fastskin (a) sin estirar y (b) estirado, junto con un esquema de la estructura formada por hilos (Dean & Bhushan, 2010).

Otra posible aplicación surge en el campo de la biomedicina, ya que muchas pacientes con materiales implantados están expuestos al asentamiento de biopelículas que pueden causar enfermedades como osteomielitis, neumonía por fibrosis quística, endocarditis valvular nativa, entre otras. Por esta razón, resulta interesante emplear superficies como Sharklet AFTM en dispositivos como marcapasos, tubos y catéteres para prevenir posibles infecciones (Lee, 2014).

Las superficies biomiméticas que intentan imitar la piel de los tiburones también son interesante en ciertas industrias como pueden ser las centrales nucleares o la industria de suministro de agua. En el caso de las centrales nucleares la presencia de biopelículas puede causar bloqueos o corrosión en los tubos de enfriamiento del condensador. En el segundo caso, las tuberías que transportan el agua pueden presentar en su superficie biopelículas y, en ocasiones, pueden crecer hongos, mejillones o incluso patógenos peligrosos. En ambos casos, la aplicación de este tipo de superficies podría ayudar a

prevenir la presencia de estos organismos (Lee, 2014). Además, en el caso de la industria de suministro de agua el revestimiento de las tuberías con este tipo de superficies podría proporcionar una aceleración del flujo de un 10% (Carlson et al., 2005), o en todo caso aplicar una técnica de raspado en el interior de las tuberías simulando la rugosidad que genera la presencia de dentículos dérmicos, pero en este caso se genera una reducción de la resistencia de más del 5% (Dean & Bhushan, 2010).

La marca Uniroyal creó unos neumáticos que tratan de evitar el *aquaplaning*, para ello también se inspiraron en la piel del tiburón, reduciendo las pérdidas de fricción, como se puede ver en el siguiente video: <https://youtu.be/3Ke3lrwqtiQ>. La empresa Sharklet technologies creó una superficie inspirada en la forma y el patrón de los dentículos dérmicos, que presenta una serie de microestructuras dispuestas en forma de diamante, como se explica en el video: <https://www.youtube.com/watch?v=h0u6bAvp1pM>. Esta superficie inhibe que las bacterias se adhieran, colonicen y formen biopelículas, por lo que se aplica en superficies multitáctiles en lugares públicos como por ejemplo botones de ascensores, cajeros o colchonetas de yoga.

5. Conclusiones

Son muchos los artículos que afirman que los dentículos dérmicos favorecen la reducción de la resistencia durante el desplazamiento de los tiburones y ayudan a prevenir el incrustamiento de ciertos organismos sobre su piel. Estas propiedades se deben a la presencia de los dentículos dérmicos, ya que facilitan el paso del flujo del agua sobre la piel del tiburón a medida que este avanza reduciendo el rozamiento. Además, reducen el tiempo de contacto de los microorganismos con la piel del tiburón y gracias a la rugosidad que generan limitan la superficie libre para que se puedan asentar los posibles colonizadores.

Gracias a las propiedades que confieren los dentículos dérmicos a la piel del tiburón surgen multitud de aplicaciones. Resulta muy interesante implementar réplicas que traten de imitar este tipo de superficies en medios de transporte como los barcos o los aviones. De este modo, se consigue una disminución en el consumo de combustible y un aumento de la velocidad de desplazamiento, como resultado de su capacidad para reducir el rozamiento. Además, en el caso del transporte marítimo, debido a su capacidad antiincrustante, ayudan a prevenir el asentamiento de los microorganismos y, por lo tanto, se reducen los costes de limpieza. Estas ventajas también se pueden conseguir al recubrir las tuberías de suministro de agua y de las centrales nucleares, ya que limitan el asentamiento de los microorganismos. La aplicación de este tipo de superficies puede ayudar a prevenir la bioincrustación en ciertas zonas de hospitales y materiales hospitalarios, zonas multitáctiles de lugares públicos o, incluso, en algún material deportivo como las esterillas. La reducción de la resistencia que

proporcionan estas superficies biomiméticas se emplea en bañadores Fastskin y en los neumáticos Uniroyal, con la intención de evitar el *aquaplaning*.

Las superficies biomiméticas de la piel del tiburón son de gran interés ya que proporciona a los objetos donde se aplican interesantes propiedades que mejoran sus cualidades. Sin embargo, su replicación todavía no es exacta debido a que es difícil imitar con precisión los reducidos tamaños de los dentículos dérmicos. Con todo, se espera que se aplique en multitud de superficies y surjan nuevos campos de estudio.

Conclusiones

Son moitos os artigos que afirman que os dentículos dérmicos favorecen a redución da resistencia durante o desprazamento dos tiburóns e axudan a previr o incrustamiento de certos organismos sobre a súa pel. Estas propiedades débense á presenza dos dentículos dérmicos, xa que facilitan o paso do fluxo da auga sobre a pel do tiburón a medida que este avanza reducindo o rozamento. Ademais, reducen o tempo de contacto dos microorganismos coa pel do tiburón e grazas á rugosidade que xeran limitan a superficie libre para que se poidan asentarse os posibles colonizadores.

Grazas ás propiedades que confiren os dentículos dérmicos á pel do tiburón xorden multitude de aplicacións. Resulta moi interesante implementar réplicas que traten de imitar este tipo de superficies en medios de transporte como os barcos ou os avións. Deste xeito, conséguese unha diminución no consumo de combustible e un aumento da velocidade de desprazamento, como resultado da súa capacidade para reducir o rozamento. Ademais, no caso do transporte marítimo, debido á súa capacidade antiincrustante, axudan a previr o asentamento dos microorganismos e, por tanto, redúcense os custos de limpeza. Estas vantaxes tamén se poden conseguir ao recubrir as tubaxes de subministración de auga e das centrais nucleares, xa que limitan o asentamento dos microorganismos. A aplicación deste tipo de superficies, pode axudar a previr a bioincrustación en certas zonas de hospitais e materiais hospitalarios, zonas multitáctiles de lugares públicos ou, mesmo, nalgún material deportivo como as esterillas. A redución da resistencia que proporcionan estas superficies biomiméticas emprégase en bañadores Fastskin e nos pneumáticos Uniroyal, coa intención de evitar o *aquaplaning*.

As superficies biomiméticas da pel do tiburón son de gran interese xa que proporciona aos obxectos onde se aplican interesantes propiedades que melloran as súas cualidades. Con todo, a súa replicación aínda non é exacta debido a que é difícil imitar con precisión os reducidos tamaños dos dentículos dérmicos. Con todo, espérase que se aplique en multitude de superficies e xurdan novos campos de estudo.

Conclusions

A lot of published research claims that shark skin dermal denticles provide drag resistance reduction while sharks are moving in the water, and they also prevent the incrustation of organisms on their skin. Dermal denticles' rough structure allows water to flow smoothly past the skin not only reducing friction and increasing their swimming efficiency but also diminishing the contact time of microorganisms with the shark skin and preventing colonizers from growing.

Many practical applications have appeared thanks to the research carried out on the properties that dermal denticles provide shark skin with. It has been proven interesting to implement replicas that try to imitate this type of surface in means of transport such as ships or aircrafts. As a result of the surface's ability to reduce drag, both fuel efficiency and speed have been improved. Moreover, maritime transport has benefitted from its antifouling property, by preventing the incrustation of organisms in the ship's hull the cleaning costs have also decreased. The same type of synthetic surface can be applied to cover water pipelines and cooling water pipelines in power stations to prevent biofouling. The application of this new surface technology in hospitals, medical equipment, multi-touch public areas or sport equipment like yoga mats can inhibit bacteria from forming colonies by creating an antibacterial film. Biomimetic surfaces or fabrics providing drag reduction have been used in swimsuits to improve swimming times or in Uniroyal tyres to prevent aquaplaning.

Shark skin biomimetic surfaces have proved a scientific breakthrough since they provide an advancement in the quality of the material created. However, the replica is not completely fulfilled as it is really difficult to imitate the microstructure of the dermal denticle. All in all, the approach is expected to work in many surfaces and in the future, new fields of study will arise which will keep evolving this technology.

6. Bibliografía

- Bar-Cohen, Y. (2006). Biomimetics: biologically inspired technologies. *Materials Today*, 9(3), 56. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71400-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71400-6)
- Bechert, D. W., Bruse, M., Hage, W., & Meyer, R. (2000). Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application. *Naturwissenschaften*, 87(4), 157–171. <https://doi.org/10.1007/s001140050696>
- Bhushan, B. (2009). Biomimetics: Lessons from Nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1445–1486. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0011>
- Biomimetics*. In *Merriam-Webster.com*. (03-06-2021). <https://www.merriam-webster.com/dictionary/biomimetics>
- Branco Rodrigues, H. C. (2009). (01-07-2021) *Dentículos dérmicos de tubarões da Costa Portuguesa: a sua utilização para identificação das diferentes espécies*. <http://hdl.handle.net/10451/1411>
- Carlson, J., Ghaey, S., Anh Tran, C., Kaplan, D., & Moran, S. (2005). Biological Materials in Engineering Mechanisms. In *Biomimetics* (pp. 365–379). <https://doi.org/10.1201/9781420037715.ch14>
- Catalá de Alemany, J. (1988). *Física*. Madrid, España: Fund. García Muñoz.
- Dean, B., & Bhushan, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4775–4806. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0201>
- Díez, G., Soto, M., & Blanco, J. M. (2015). Biological characterization of the skin of shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* and preliminary study of the hydrodynamic behaviour through computational fluid dynamics. *Journal of Fish Biology*, 87(1), 123–137. <https://doi.org/10.1111/jfb.12705>
- Domel, A. G., Domel, G., Weaver, J. C., Saadat, M., Bertoldi, K., & Lauder, G. V. (2018). Hydrodynamic properties of biomimetic shark skin: effect of denticle size and swimming speed. *Bioinspiration & Biomimetics*, 13(5), 056014. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aad418>
- Du Clos, K. T., Lang, A., Devey, S., Motta, P. J., Habegger, M. L., & Gemmell, B. J. (2018). Passive bristling of mako shark scales in reversing flows. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(147), 20180473. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0473>
- Feld, K., Kolborg, A. N., Nyborg, C. M., Salewski, M., Steffensen, J. F., & Berg-Sørensen, K. (2019). Dermal Denticles of Three Slowly Swimming Shark Species: Microscopy and Flow Visualization. *Biomimetics*, 4(2), 38. <https://doi.org/10.3390/biomimetics4020038>
- Fu, Y. F., Yuan, C. Q., & Bai, X. Q. (2017). Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. *Biosurface and Biotribology*, 3(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>
- Gherardelli, C. (2007). Capa límite. In *Mecánica de Fluidos* (pp. 116–131). Universidad de Chile.
- Lee, M. (2014). *Remarkable Natural Material Surfaces and Their Engineering Potential* (M. Lee (Ed.); 2014th ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03125-5>

- Martin, S., & Bhushan, B. (2016). Discovery of riblets in a bird beak (Rynchops) for low fluid drag. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2073), 20160134. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0134>
- Oeffner, J., & Lauder, G. V. (2012). The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications. *Journal of Experimental Biology*, 215(5), 785–795. <https://doi.org/10.1242/jeb.063040>
- Pu, X., Li, G., & Huang, H. (2016). Preparation, anti-biofouling and drag-reduction properties of a biomimetic shark skin surface. *Biology Open*, 5(4), 389–396. <https://doi.org/10.1242/bio.016899>
- Pu, X., Li, G., Huang, H., Liu, Y., & Ashraf, M. A. (2017). Using Bio-Replicated Forming Technologies to Fabricate Shark-Skin Surface. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 60, 1–15. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2017160511>
- Raschi, W., & Tabit, C. (1992). Functional aspects of placoid scales: A review and update. *Marine and Freshwater Research*, 43(1), 123–147. <https://doi.org/10.1071/MF9920123>
- Sarikaya, M., Tamerler, C., Jen, A. K. Y., Schulten, K., & Baneyx, F. (2003). Molecular biomimetics: Nanotechnology through biology. *Nature Materials*, 2(9), 577–585. <https://doi.org/10.1038/nmat964>
- Solga, A., Cerman, Z., Striffler, B. F., Spaeth, M., & Barthlott, W. (2007). The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2(4), S126–S134. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/2/4/S02>
- Sullivan, T., & Regan, F. (2011). The characterization, replication and testing of dermal denticles of *Scyliorhinus canicula* for physical mechanisms of biofouling prevention. *Bioinspiration and Biomimetics*, 6(4), 046001. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/4/046001>
- Wegner, C., & Dumcke, R. (2017). Design inspiration: the secrets of shark skin. *Science in School*, 2017(41), 17–23.
- Wegst, U. G. K., Bai, H., Saiz, E., Tomsia, A. P., & Ritchie, R. O. (2015). Bioinspired structural materials. *Nature Materials*, 14(1), 23–26. <https://doi.org/10.1038/nmat4089>
- Wen, L., Weaver, J. C., & Lauder, G. V. (2014). Biomimetic shark skin: Design, fabrication and hydrodynamic function. *Journal of Experimental Biology*, 217(10), 1656–1666. <https://doi.org/10.1242/jeb.097097>
- Zari, M. P. (2010). Biomimetic design for climate change adaptation and mitigation. *Architectural Science Review*, 53(2), 172–183. <https://doi.org/10.3763/asre.2008.0065>