



XXIV International Conference
of the Iberoamerican Society
of Digital Graphics
Medellín | Colombia

A methodology for the evaluation, analysis, and selection of bioinspired textures, using Computational Fluid Dynamics (CFD) and wind tunnel for aerodynamic improvements in sports design

David A. Torreblanca-Díaz

Universidad Pontificia Bolivariana | Colombia | david.torreblanca@upb.edu.co

Raúl Adolfo Valencia Cardona

Universidad Pontificia Bolivariana | Colombia | raul.valencia@upb.edu.co

Juan Carlos Perafán López

Universidad Pontificia Bolivariana | Colombia | juan.perafan@upb.edu.co

Gustavo Adolfo Sevilla Cadavid

Universidad Pontificia Bolivariana | Colombia | gustavo.sevilla@upb.edu.co

Abstract

Sports disciplines have evolved in recent decades to improve the performance of athletes, as a result of interdisciplinary convergence. Computational Fluid Dynamics (CFD) and wind tunnel have gained relevance in sports design to predict the aerodynamic behavior. On the other hand, Bio-informed disciplines study nature to solve human problems, in order to generate innovation with or without sustainable results. This text presents a first proposal of a methodology oriented to the evaluation, analysis, and selection of bioinspired digital textures, in order to improve the aerodynamic performance in sports product design, through the integration of CFD and wind tunnel testing.

Keywords: Aerodynamics; Bio-informed disciplines; Computational Fluid Dynamics (CFD); Sports Engineering; Computer Aided Engineering (CAE).

INTRODUCCIÓN

Las disciplinas deportivas han evolucionado en las últimas décadas para mejorar el rendimiento de los deportistas, resultado de una convergencia interdisciplinaria y al uso de herramientas digitales para simulación digital, aplicación de nuevos materiales, entre otros avances. En este contexto, la *Dinámica de Fluidos Computacional*, o su nombre en inglés *Computational Fluid Dynamics* (CFD) y el uso del túnel de viento han ganado protagonismo en el diseño de productos deportivos para predecir el comportamiento aerodinámico de un cuerpo en un entorno controlado (Defraeye, 2010) (Hanna, 2012) (Li, 2015). Uno de los más recientes usos del CFD en el deporte, es en competiciones de natación, donde se requiere evaluar las fuerzas hidrodinámicas alrededor de la mano y antebrazo del nadador para mejorar su eficiencia propulsiva en los diferentes estilos (Samson, 2018). Otro ejemplo importante es el ciclismo, donde se ha analizado la aerodinámica de la bicicleta, la postura del ciclista y la superficie del traje, así como elementos de protección (Blocken, 2019). Otro de los deportes que ha utilizado en forma recurrente las tecnologías CFD, es el salto de esquí donde se ha investigado tanto a nivel computacional como experimental en el túnel del viento las fuerzas aerodinámicas en una amplia gama de ángulos de ataque (Meile, 2006; Gardan, 2015).

Por otra parte, las disciplinas bioinformadas son aquellas que utilizan referentes de la naturaleza para resolver

problemas del ser humano, con el propósito generar innovación con o sin resultados sustentables (Louguina, et al., 2014). Las disciplinas bioinformadas se potencian con la integración de las tecnologías digitales emergentes; Oxman (2013) plantea que, junto con el interés creciente en los campos de la biología, matemáticas y geometría, las tecnologías digitales están abriendo nuevos lugares para las teorías, metodologías y praxis del diseño, con un enfoque transdisciplinario.

La aplicación de texturas bioinspiradas en diseño de productos y sistemas permite mejorar aspectos de funcionalidad, *uso-interacción* y *estético-comunicativos* (Torreblanca, 2018). En el ámbito deportivo se destaca la empresa Speedo, que desarrolló un traje hidrodinámico con superficies basadas en la piel del tiburón, con resultados de alto desempeño (Bramall, 2008).

En este texto se presenta una propuesta metodológica para la evaluación, análisis y selección de texturas digitales bioinspiradas para mejorar el desempeño aerodinámico, a través de las tecnologías CFD y el uso del túnel de viento. Este trabajo muestra los resultados de la primera propuesta metodológica, los resultados experimentales de esta etapa inicial permitirán desarrollar en etapas posteriores un método aplicable al diseño de productos deportivos, incluso extrapolable a otras áreas. Este trabajo toma como base el proyecto sobre texturas bioinspiradas desarrolladas por la Línea de Investigación en Morfología



Experimental -LIME-, del Grupo de Investigación de Estudios en Diseño -GED-, de la Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, en Medellín Colombia. Ver figura 1.

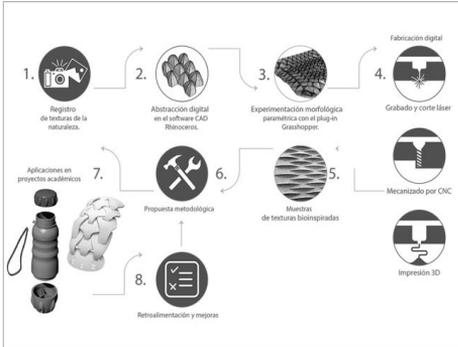


Figura 1: Síntesis del proceso investigativo del proyecto de texturas bioinspiradas, esquema realizado por los autores.

METODOLOGÍA

Se conforma un equipo multidisciplinario, liderado por profesores-investigadores de diseño industrial, ingeniería mecánica e ingeniería aeronáutica, en una colaboración activa con estudiantes de pregrado. Se propone un método empírico-analítico con una metodología experimental, en el cual las actividades prácticas, el ensayo y error son el eje central del proceso investigativo. Según la profesora Martha Arias citada a través de (Patiño, 2005), el método empírico-analítico aborda una dimensión material, con un interés técnico y utilizando metodologías descriptiva, correlacional y experimental.

Se propone la siguiente secuencia metodológica: generación de texturas digitales bioinspiradas, fabricación de muestras, estudio de CFD, validación aerodinámica en el túnel de viento, conclusión y selección de texturas, ver figura 2.

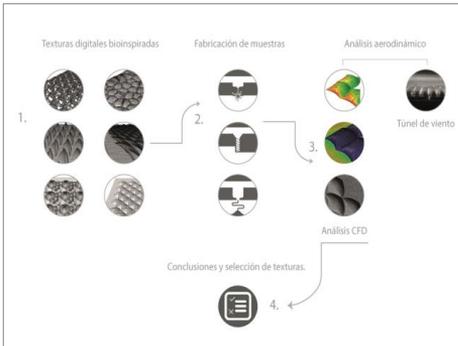


Figura 2: Secuencia metodológica, esquema realizado por los autores.

1. TEXTURAS DIGITALES BIOINSPIRADAS Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS

En el proyecto se utilizan las texturas bioinspiradas desarrolladas por la Línea de Investigación en Morfología

Experimental -LIME-, del Grupo de Investigación de Estudios en Diseño -GED-, de la Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. En esa investigación se estudiaron 136 especies vegetales, de los reinos de plantas y hongos del Valle del Aburrá en la zona de Medellín, Colombia. Como resultado del proceso investigativo se obtienen 23 modelos digitales de texturas con el software CAD (Computer Aided Design) Rhinoceros®, un total de 40 muestras físicas y diversas experimentaciones a través las siguientes tecnologías de fabricación digital: impresión 3D, fresado por CNC (Computer Numerical Control), corte y grabado con láser.

Con el propósito de optimizar los tiempos y recursos de la investigación, se hace una preselección de texturas para ser utilizadas en la etapa de análisis aerodinámico. Como se puede ver en la figura 3 se eligen 6 texturas bioinspiradas para ser evaluadas a través del análisis CFD y túnel de viento, usando criterios de desempeño aerodinámico por medio de análisis cualitativo. Los criterios para la preselección fueron: variedad morfológica, organización geométrico-espacial de los módulos en la rejilla de la textura, simetría del módulo, análisis de bordes de ataque y fuga del módulo, y coeficiente de arrastre del módulo.

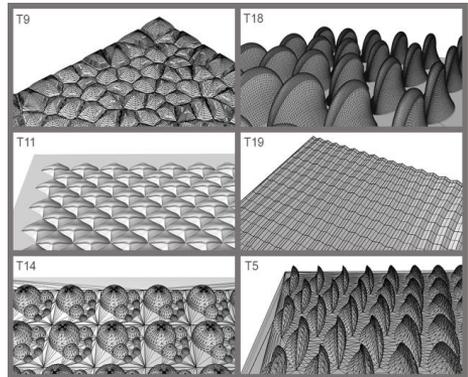


Figura 3: Texturas bioinspiradas preseleccionadas para el análisis aerodinámico, modelos digitales y esquema realizado por los autores.

Luego, para el montaje en el túnel de viento se usan las muestras de madera sólida de roble, mecanizadas con fresado por CNC, de 200 x 200 mm. Utilizando estas muestras de madera como modelo (máster) se realizan piezas poliméricas a través del proceso de termoformado usando PAI (Poliestireno de Alto Impacto), luego se pintan de color negro para visualizar y tener un mejor contraste del flujo de aire en el túnel de viento, ver figura 4.



Figura 4: Muestras de texturas bioinspiradas de 200x200 mm, madera sólida de roble (mecanizadas por CNC) y de PAI (Poliestireno de Alto Impacto), hechas con el proceso de termoformado. Fotografías de los autores.

2. ANÁLISIS AERODINÁMICO COMPUTACIONAL CON CFD

Esta etapa busca comprender el comportamiento *fluidodinámico* del aire sobre la superficie de seis texturas bioinspiradas preseleccionadas en etapa anterior, comparando el efecto de sus bordes, el ángulo de incidencia y los patrones simétricos sobre el coeficiente de arrastre a diferentes velocidades.

El análisis aerodinámico comenzó con una prueba de calibración del modelo CFD, en un inicio calculando el coeficiente de arrastre de una esfera, una geometría ampliamente documentada en la literatura (Schlichting, 2016), ver figura 5.

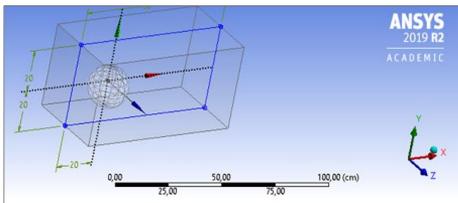


Figura 5: Esfera ubicada en la sección de pruebas del túnel de viento; modelo digital realizado por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

Luego se analizaron las seis texturas, con el objeto de reducir los tiempos de procesamiento computacional se analizan partes de la textura, primero se estudia un módulo y luego tres módulos para cada una, a diferentes valores de velocidad en un rango de interés entre 6.39 a 39.10 m/s. Ver figura 6.

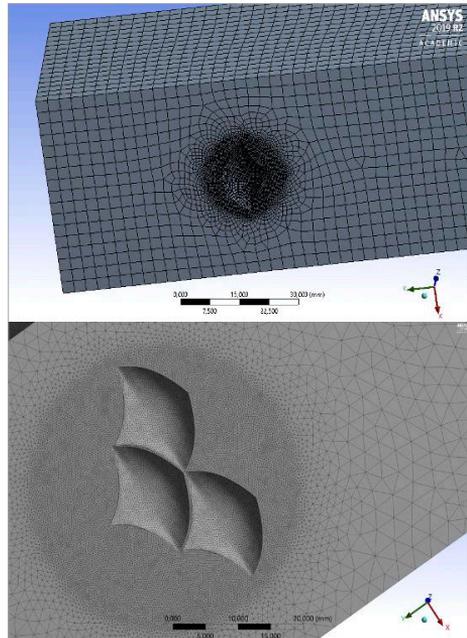


Figura 6: Ejemplos de uno y tres módulos de la textura T11 analizado en CFD. Modelos digitales y análisis CFD realizados por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

Tanto la esfera como las texturas fueron ubicados en un dominio computacional de flujo de aire con las dimensiones de la sección de prueba del túnel del viento (80 cm x 40 cm x 60 cm), con un ángulo de ataque de 0°. Inicialmente se analizaron tres modelos de flujo para la esfera: un modelo laminar y dos modelos turbulentos (k-epsilon y Spalart-Allmaras). Finalmente, este último fue seleccionado para ser aplicado en las texturas por presentar un menor rango de error. En cuanto a las condiciones de frontera, a la entrada del dominio fue definida una condición de velocidad y a la salida una condición de flujo desarrollado. Las demás caras del dominio fueron definidas con una condición de simetría y la pared de la esfera fue definida con una condición de pared, ver figura 7.

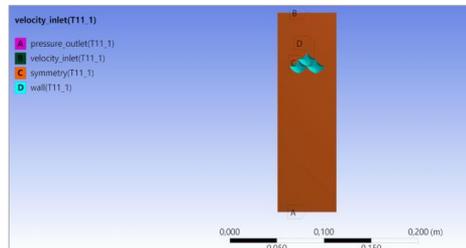


Figura 7: Condiciones de frontera del dominio computacional. Modelos digitales y análisis CFD realizados por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

El comportamiento del flujo fue modelado con las ecuaciones de Navier-Stokes y fue resuelto con el *solver* de la herramienta comercial Fluent (Ansys); esta solución el modelo matemático por el método de volúmenes finitos:

$$\nabla \cdot u = 0, \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) = -\nabla p + \mu \Delta u + f,$$

donde ρ y μ es la densidad y viscosidad del fluido (en este caso aire), u y p es la velocidad y presión del flujo, t es el tiempo y f son las fuerzas de volumen. Para el proceso de mado se analizaron diferentes tamaños de malla y fue chequeado la sensibilidad de la malla con la solución de tal manera que el porcentaje de error fuera inferior al 10%. La calidad de la malla fue analizada con tres métodos: calidad de la malla, la relación de aspecto y la oblicuidad. Los dos primeros parámetros deben tener un valor cercano a uno para que sea aceptable y el último parámetro debe tener un valor cercano a cero. Además, para obtener una mayor información de la zona cercana a la superficie de la textura y poder observar fenómenos como el desprendimiento de la capa límite y puntos de estancamiento, se hizo un mayor refinamiento de la malla a través de la herramienta Face Sizing, ver figura 8.

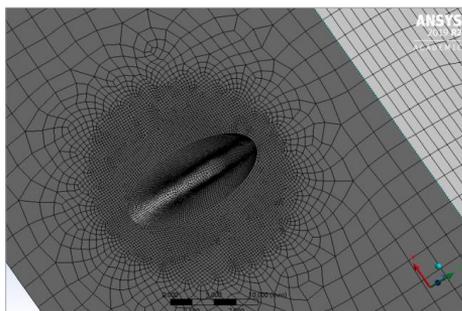


Figura 8: Refinamiento malla de un módulo de la textura T18 con la herramienta Face Sizing. Modelos digitales y análisis CFD realizados por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

Esta herramienta permite, mediante dominios esféricos de influencia y junto con el método de mado hexagonal dominante coordinar una cantidad adecuada de elementos armónicos alrededor de la zona de interés. Este refinamiento también se debe asociar con un parámetro denominado y^+ para obtener un comportamiento adecuado de las diferentes subcapas viscosas e inerciales de la capa límite en regímenes turbulentos. La herramienta inflación fue utilizada para obtener el valor de la altura y de la primera subcapa viscosa y es posible obtenerlo a partir de la siguiente ecuación para un valor de y^+ definido:

$$y = \frac{y^+ \mu}{U_\tau \rho}$$

donde U_τ es la velocidad de fricción. Para el paso del tiempo fue considerado el número de Strouhal y fue definido su valor en función del número de Reynolds.

3. ESTUDIO AERODINÁMICO EN EL TÚNEL DE VIENTO

El túnel de viento es una herramienta fundamental para entender fenómenos físicos relacionados con la dinámica de fluidos en cualquier instancia de diseño de un artefacto aerodinámico. Con este tipo de herramientas se trata de recrear condiciones operacionales en un ambiente

controlado con el fin de reducir los costos y extraer información que puede ser útil para el diseño o rediseño de dicho artefacto.

En la actualidad las pruebas en túneles de viento siguen estando vigentes, porque a diferencia del CFD, no es necesario realizar simplificaciones de los modelos a probar, lo que conduce a una información más precisa en cuanto a la visualización del flujo a través del elemento y las cargas aerodinámicas del mismo. Además, sirve como un medio de validación para la información extraída de un estudio CFD.

El túnel de viento de la Universidad Pontificia Bolivariana, Campus en Medellín, es un túnel de viento subsónico con una velocidad máxima de 41 m/s a condiciones atmosféricas estándar, y circuito abierto. La zona de pruebas del túnel de viento tiene unas dimensiones lineales de 80 x 40 x 60 cm. Este túnel cuenta con dos celdas de carga para medir en tiempo real, fuerzas en los tres ejes. Para realizar este ensayo se seleccionó la balanza ATI Industrial Automation Gamma debido a que se esperaban fuerzas de arrastre relativamente bajas relacionadas a lo pequeño del área proyectada de las texturas. La balanza ATI Industrial Automation Gamma cuenta con un rango de cargas de 3 kgF tanto para el eje x (arrastre) y eje y (fuerzas laterales), adicionalmente, el rango de cargas en el eje z (sustentación) es de 10 KgF.

Con el fin de validar los datos del túnel de viento se realizó un ensayo comparativo del número de Reynolds y el coeficiente de arrastre de una esfera de superficie lisa de diámetro 0,3 m en un rango de velocidades entre 0 y 39m/s. El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho L V_\infty}{\mu},$$

donde ρ es la densidad del fluido, L es la longitud característica del objeto, V_∞ la velocidad del fluido y μ la viscosidad dinámica del fluido. Además, el coeficiente de arrastre se define como:

$$C_D = \frac{D}{qS}$$

Donde D es la fuerza de arrastre, q es la presión dinámica y S el área mojada del modelo.

Los datos obtenidos en el ensayo se contrastaron con información contenida en (Schlichting, 2016). En la Figura 9, se observa que los datos obtenidos por la balanza tienen un error relativo poco significativo en el rango de Reynolds entre $Re=1E5$ y $Re=3E5$, por lo que la balanza ATI es más confiable para datos obtenidos de fuerzas de arrastre en rangos de velocidades de entre los 10 m/s y 28 m/s aproximadamente.

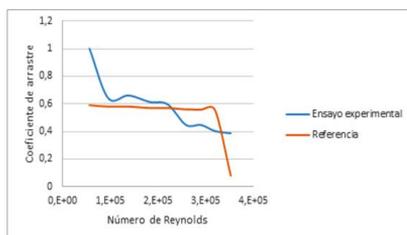


Figura 9: Validación de la balanza del túnel de viento utilizando las variables adimensionales, Número de Reynolds y Coeficiente de Arrastre. Gráfico realizado por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

Cuatro texturas fueron evaluadas en el túnel de viento; se incluyó una superficie de referencia sin ninguna rugosidad. Las dimensiones de las muestras de texturas se especifican en la Sección 1 de la metodología. Para el montaje de la prueba se utilizó un soporte en forma de Y[RAVC1], donde además se ubicó un brazo adicional del modelo al soporte con el fin de eliminar cualquier momento causado por las fuerzas aerodinámicas. Previo a la realización de las pruebas se midió el arrastre generado por el soporte para no incluirlo en la toma de datos de las texturas. Las texturas se ubicaron en dirección paralela a la dirección del flujo, $\alpha = 0^\circ$. Las condiciones atmosféricas a las cuales se realizó el experimento fueron las siguientes $V_\infty = 25 \text{ m/s}$, $h = 1490 \text{ m}$, $P_{atm} = 102200 \text{ Pa}$ y $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$. Para capturar de manera cualitativa los patrones de flujo a través de las texturas, se usó una cámara de alta velocidad (Phantom MIRO 110) y un generador de humo. Las imágenes fueron analizadas con el software Phantom Camera Control.

4. CONCLUSIONES Y SELECCIÓN DE TEXTURAS

Se analizan los resultados del procesamiento CFD y estudio del túnel de viento para seleccionar las texturas con mejor desempeño aerodinámico. Los criterios de selección son los siguientes: menor coeficiente de arrastre generado por la morfología de la textura, evitando un desprendimiento prematuro de la capa límite, con una transición temprana de la capa laminar a la turbulenta, e idealmente sin presentar secciones con estancamiento de flujo.

RESULTADOS

ANÁLISIS A TRAVÉS DE CFD

El análisis comienza con el estudio de un módulo de la textura, para determinar los perfiles de velocidad, presión y coeficiente de arrastre en el rango de las velocidades analizadas, ver figura 10. Los módulos fueron ubicados de tal manera que la cara enfrentada al flujo tuviera la menor área posible para que no representará un aumento en el coeficiente de arrastre. Para analizar estos perfiles de velocidad y presión, se debe revisar puntos de estancamiento, puntos donde se da el desprendimiento de la capa límite, formación de vórtices, entre otros. Por ejemplo, en la parte frontal de la figura 10, se observa un punto de estancamiento donde se da el choque del flujo con la geometría, la velocidad es casi nula y la presión tiene un comportamiento inversamente proporcional aumentando su valor. La capa límite al comienzo es muy delgada, pero a medida que el flujo avanza sobre la

superficie de la geometría y la velocidad aumenta, se presenta un cambio brusco en el espesor de la capa límite, abriendo la posibilidad de generar vórtices aguas abajo y producir esfuerzos cortantes en esas zonas. Esta situación de desprendimiento prematuro de la capa límite se vuelve más crítica a medida que exista un mayor gradiente de presión entre la parte frontal y posterior de la geometría.

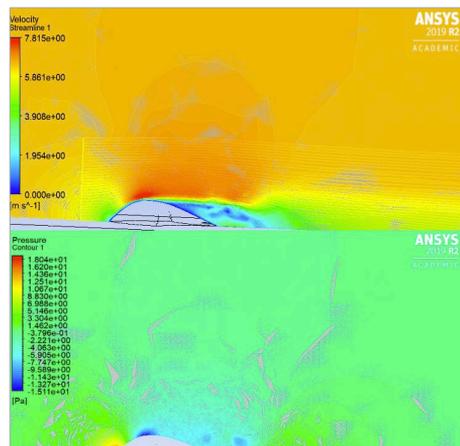


Figura 10: Velocidad y presión para textura la T11 a 6.39 m/s. Gráficos de contorno y análisis realizados por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

Al hacer el análisis de cada módulo y obtener el coeficiente de arrastre a diferentes velocidades, ver figura 11, es posible evidenciar que el módulo con menor arrastre generado es el módulo T5, seguido por el módulo T18 en la disposición lateral de menor área enfrentada y en tercer lugar está el módulo T11. Por otro lado, los módulos que presentan el mayor coeficiente de arrastre son los 14, 19 y 9 en ese orden respectivamente, entonces respecto a su desempeño aerodinámico para este caso de estudio quedan descartados.

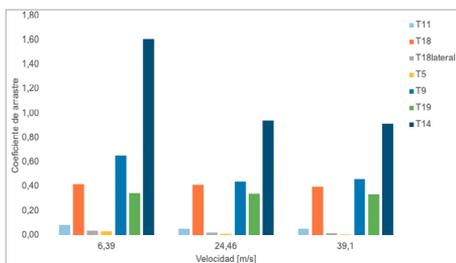


Figura 11: Coeficiente de arrastre (Cd) para las seis texturas, análisis de un módulo por textura, a las velocidades de 6.39, 24.46 y 39.10 m/s. Gráfico realizado por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

Como se ve en la Figura 12, para el análisis de tres módulos, solamente fueron analizados las tres texturas que arrojaron los mejores resultados, nombradas como T5, T18 y T11. Los parámetros geométricos para el cálculo del coeficiente de arrastre para estos módulos se pueden ver en la tabla 1.

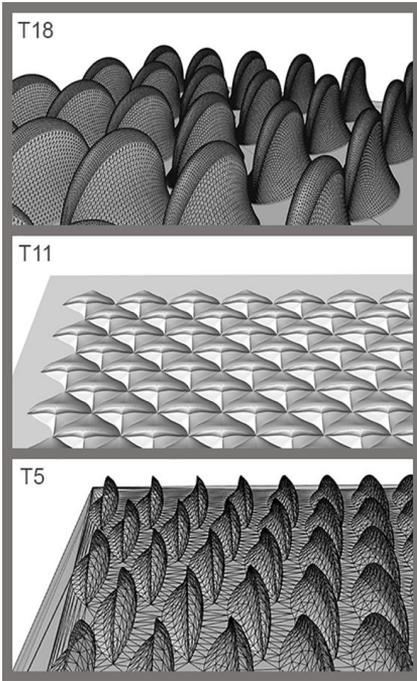


Figura 12: Texturas seleccionadas para hacer el estudio de CFD, modelos digitales realizados por los autores.

Tabla 1: Parámetros geométricos para el cálculo del coeficiente de arrastre para texturas de tres módulos, tabla realizada por los autores.

Módulo	Longitud característica [m]	Área proyectada [m ²]
T11	0.0208	0.0001615
T18	0.0208	0.0008802
T5	0.0226	0.0006753

El comportamiento *fluido-dinámico* de estas texturas seleccionadas con un patrón de tres módulos tienen un desprendimiento de la capa límite menos prematuro con poca formación de puntos de estancamiento y vórtices, ver figuras 13 y 14.

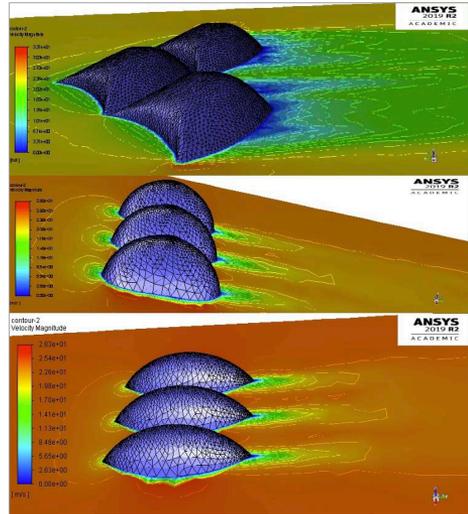


Figura 13: Velocidad para textura T11, T18 y T5 a 24.46 m/s. Gráficos de contorno y análisis realizados por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

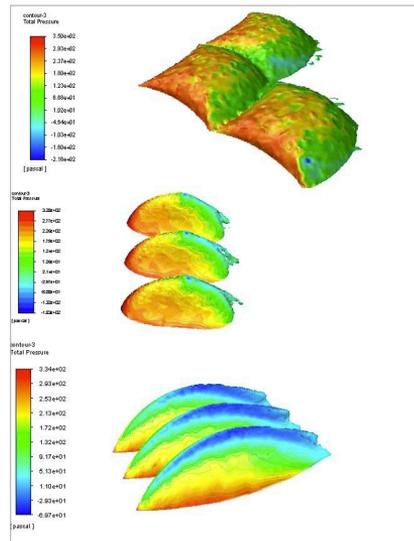


Figura 14: Presión para textura T11, T18 y T5 a 24.46 m/s. Gráficos de contorno y análisis realizados por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

Respecto al coeficiente de arrastre aerodinámico, el patrón de tres módulos con menor valor fue la textura T5, seguido muy de cerca de la textura T18 y con una diferencia significativa mayor la T11, por lo que finalmente se puede afirmar que la textura T5 presenta un mejor desempeño aerodinámico, ver la figura 15.

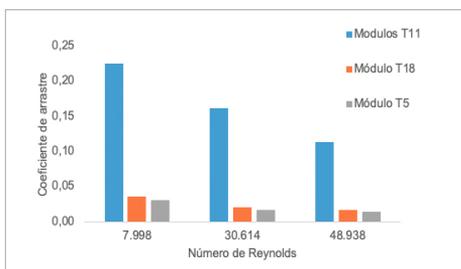


Figura 15: Coeficiente de arrastre (Cd) para texturas T11, T18 y T5, texturas de tres módulos a las velocidades de 6.39, 24.46 y 39.10 m/s. Gráfico realizado por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

ESTUDIO EN EL TÚNEL DE VIENTO

Usando las muestras termoformadas de 200 x 200 mm, se realizaron 10 estudios de la fuerza de arrastre para cada textura con el fin de generar una tendencia en los datos a una velocidad constante de 39 m/s. Como resultado, la muestra T11 presentó la mayor reducción en la fuerza de arrastre en aproximadamente un 35% en relación con la superficie de referencia, ver Figura 16.

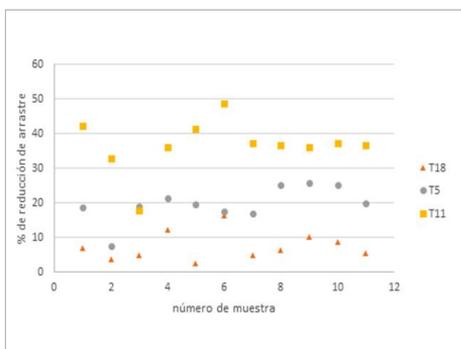


Figura 16: Porcentaje de reducción del arrastre relativo de las texturas T18, T5 y T11 respecto a la superficie de referencia. Gráfico realizado por los autores y el estudiante David Alexander Oliva Patiño.

La capa límite es un fenómeno transitorio de un fluido y se puede cuantificar a partir del número de Reynolds. Comúnmente, la capa límite laminar aparece condiciones de velocidad del fluido relativamente bajas, no obstante, si esta velocidad aumenta considerablemente, el flujo entra en un estado de transición hasta alcanzar una capa límite turbulenta. Sin embargo, esta transición entre capa límite laminar a turbulenta puede alcanzarse con mayor rapidez dependiendo de la rugosidad de los objetos (Incropera, 2011).

Aunque se puede considerar que el arrastre parásito puede de cierta forma aumentar debido a la presencia de una textura rugosa, el arrastre debido a la forma puede disminuir considerablemente. La disminución en el arrastre de forma se debe principalmente a que la capa límite turbulenta puede retrasar el desprendimiento del fluido con la superficie. Este efecto se intensifica en la parte posterior del elemento aerodinámico cuando el fluido alcanza una

mayor energía potencial, dicha adhesión del fluido en la parte posterior a la superficie del elemento sugiere que el gradiente de presiones puede disminuir en cierta medida.

Con el fin de identificar la presencia de una capa límite turbulenta en la superficie de la textura, se realizaron ensayos adicionales de visualización utilizando un generador de humo, registrado con una cámara de video de alta velocidad que permitió captar imágenes de 1000 f/s. En la Figura 17 se observa como la superficie T11 genera una transición temprana de flujo laminar a flujo turbulento identificado por una variación en las líneas de flujo que están representada por una serie de líneas discontinuas blancas en la sección aguas abajo de la textura. Este flujo energizado se mantiene adherido a la superficie hasta su terminación lo que disminuye como se mencionó previamente, el gradiente de presión, por ende, el arrastre de forma.



Figura 17: Prueba en el túnel de viento y líneas de flujo de la textura T11 utilizando una cámara de alta velocidad (proporcionada por el Grupo Automática y Diseño A+D) y un generador de humo. La dirección del flujo va en dirección derecha a izquierda. Registro realizado por los autores Prueba y fotografía realizada por Johana Milena Hoyos Ruiz, Juan Carlos Perafán López y el estudiante Manuel Alejandro Lozano Rivillas.

DISCUSIÓN

Después de las actividades realizadas y la experiencia vivida en esta primera etapa de la investigación, surgen los siguientes análisis y conclusiones:

La simplificación geométrica de las texturas en el CFD fue clave porque permitió reducir los largos tiempos de procesamiento computacional, haciendo factible el desarrollo de los análisis en tiempos más manejables, que además requieren computadores de alta gama. Los resultados preliminares del CFD permitieron además hacer una preselección de las texturas con mejor desempeño aerodinámico, haciendo posible guiar y facilitar el proceso experimental realizado en el túnel de viento para optimizar recursos de tiempo, técnicos y de personal.

El estudio aerodinámico de las texturas se hizo a nivel micro en CFD (entre uno y tres módulos) y luego a nivel macro en el túnel de viento (alrededor de 120 módulos por textura), ampliando la entrega información para la toma de decisiones y complementando el uso de las tecnologías de simulación digital con técnicas analógicas.

Desde un punto de vista morfológico la forma del módulo, su posición y su organización *geométrico-espacial* en la rejilla de la textura, tiene una alta incidencia en su rendimiento aerodinámico, por lo tanto, los resultados cambian notablemente si se modifican estas variables. Los estudios hechos se podrían ampliar explorando nuevas opciones, por ejemplo, todos los análisis de esta etapa se hicieron considerando un ángulo cero y se podrían hacer nuevos análisis en diferentes ángulos.

La investigación en esta primera etapa evidencia la posibilidad de utilizar morfologías de la naturaleza para ser evaluados con herramientas de análisis aerodinámico para posibles aplicaciones en proyectos de diseño e ingeniería; por otra parte, se valida la propuesta metodológica con un enfoque multidisciplinario, pero es necesario hacer nuevas experimentaciones para mejorar la propuesta metodológica, integrando los ajustes que emergen de esta primera experiencia.

Para el trabajo futuro se espera aplicar los resultados de esta investigación a proyectos de diseño deportivo, incluso ampliar las aplicaciones a otras áreas, tales como aeronáutica, automotriz, por mencionar algunos. Por último, este trabajo utilizó texturas bioinspiradas con una condición *estática*, entonces se visualiza la oportunidad de generar a futuro texturas paramétricas y dinámicas, capaces de responder estímulos del entorno, transformarse y adaptarse, la investigación podría avanzar hacia la propuesta de un sistema de *texturas bioinspiradas responsivas, adaptativas y evolutivas*.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación – CIDI – de la Universidad Pontificia Bolivariana, por el apoyo brindado a todas las actividades investigativas. Junto con esto, expresamos nuestro agradecimiento a la Facultad de Diseño Industrial, Facultad de Ingeniería Nanotecnología-Mecánica, a través del grupo Automática y Diseño A+D y la Facultad de Ingeniería Aeronáutica, por dar todas las facilidades necesarias para el desarrollo de la investigación.

Damos gracias a la investigadora Johana Milena Hoyos Ruiz por su apoyo en las actividades experimentales realizadas en el túnel de viento. Hacemos un reconocimiento especial al importante aporte de los estudiantes del semillero A+D, David Alexander Oliva Patiño y Miguel Ángel Naranjo Cano en el desarrollo del estudio CFD, a Manuel Alejandro Lozano Rivillas por su colaboración durante las pruebas experimentales en el túnel de viento.

REFERENCIAS

- Bergman, T. L., Incropera, F. P., Lavine, A. S., & DeWitt, D. P. (2011). Introduction to heat transfer. John Wiley & Sons.
- Blocken, B., van Druenen, T., Teparlar, Y., & Andrianne, T. (2019). CFD analysis of an exceptional cyclist sprint position. *Sports Engineering*, 22(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s12283-019-0304-7>
- Bramall, L. (2008). Simulating swimwear for increased speed. *ANSYS Advantage*, 2(2), 4-6.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2010). Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests. *Journal of Biomechanics*, 43(7), 1262–1268. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.01.025>
- Gardan, Nicolas & Laheurte, J. & Gouy, E. & Dey, Nilanjan & Abdi, Ellie & Asgher, Umer & Choukou, Mohamed-Amine & Schneider, Alexandre & Taïar, Redha. (2015). Computational fluid dynamics for the nordic combined skiing jump. *Series on Biomechanics*. 29. 31-38.
- Hanna, R. K. (2012). CFD in sport - A retrospective; 1992 - 2012. *Procedia Engineering*, 34, 622–627. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.106>
- Iouguina, A., Dawson, J.W., Hallgrímsson, B., Smart, G. (2014). Biologically informed disciplines: a comparative analysis of bionics, biomimetics, biomimicry, and bio-inspiration among others. *Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics*. Vol. 9, No. 3. 197–205.
- Li, T. Z., & Zhan, J. M. (2015). Hydrodynamic body shape analysis and their impact on swimming performance. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 17(4), 3–11. <https://doi.org/10.5277/ABB-00200-2014-03>
- Meile, W., Reisenberger, E., Mayer, M., Schmöler, B., Müller, W., & Brenn, G. (2006). Aerodynamics of ski jumping: experiments and CFD simulations. *Experiments in Fluids*, 41(6), 949–964. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0213-y>
- Oxman Rivka (2013) in Frederic Migayrou Marie-Ange Brayer (eds.) *Archilab 2013: Naturalizing Architecture*, Publisher HX, ISBN 9782910385828.
- Patiño, E. (2015). Introducción a la investigación formativa en diseño. Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana ISBN 9789587642919.
- Samson, M., Monnet, T., Bernard, A., Lacouture, P., & David, L. (2018). Analysis of a swimmer's hand and forearm in impulsive start from rest using computational fluid dynamics in unsteady flow conditions. *Journal of Biomechanics*, 67, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.12.003>
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). *Boundary-layer theory*. Springer.
- Torreblanca Díaz, D. A. (2018). Bio-inspired parametric textures applications in academic design projects. *Sigradi2018* (págs. p. 997-1003). São Paulo: Blucher. DOI:10.5151/sigradi2018-1370