

RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y LA RESISTENCIA
MECÁNICA DEL ALA DE LA LIBÉLULA

MARIANA CASTRILLÓN ARROYAVE

VALENTINA TRUJILLO FERNÁNDEZ

MARIA CLARA SERNA ROJAS

Monografía para optar al título de Diseñador Industrial

DIRECTOR

Andrés Hernando Valencia Escobar

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN-ANTIOQUIA

2019

RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y LA RESISTENCIA
MECÁNICA DEL ALA DE LA LIBÉLULA

AUTORAS

MARIANA CASTRILLÓN ARROYAVE

VALENTINA TRUJILLO FERNANDEZ

MARIA CLARA SERNA ROJAS

ASESORES

ANDRÉS VALENCIA

ELSIE ARBELAEZ

DAVID TORREBLANCA

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN-ANTIOQUIA

2019

TABLA DE CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- 1.1 Tema general del proyecto
- 1.2 Características generales del proyecto de investigación
- 1.3 Descripción del problema de investigación identificado
- 1.4 Pregunta e hipótesis de investigación
- 1.5 Elementos del problema de investigación
- 1.6 Limitaciones de la investigación: alcance y riesgos

2. JUSTIFICACIÓN

3. MARCO DE REFERENCIA

- 3.1 Marco teórico
 - 3.1.1 Características de ala de la libélula
 - 3.1.2 Conceptualización de los elementos del problema
- 3.2 Estado del arte

4. OBJETIVOS

- 4.1 Objetivo general
- 4.2 Objetivos específicos

5. METODOLOGÍA

- 5.1 Definición de la condición estructural del ala y sus variables formales
- 5.3 Elaboración de modelos físicos y digitales con la geometría abstraída del ala
- 5.3 Experimentación sobre los modelos
- 5.4 Simulación sobre modelos digitales.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- 6.1 Definición de la condición estructural del ala y sus variables formales
- 6.2 Elaboración de modelos físicos y digitales con la geometría abstraída del ala
- 6.3 Experimentación sobre los modelos
- 6.4 Simulación sobre modelos digitales.

7. CONCLUSIONES

8. RECOMENDACIONES

9. REFERENCIAS

10. ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caracterización de las partes del ala de la libélula. Chen, C. H. (1953).	11
Figura 2. Sistema de venación según sistema de Comstock-Needham. Fraser (1948)	12
Figura 3. Definición del ángulo de bifurcación. Sudo & Tsuyuki (1999)	13
Figura 4. Estructura basada en la tela de araña, diseñada por el arquitecto Dennis Dollens.	15
Figura 5. Estructura efímera a base de tubos de cartón diseñada por el arquitecto Shigeru Ban.	17
Figura 6. Fotografía de ala posterior tomada en el ITM.	21
Figura 7. Digitalización del ala promedio en Illustrator.	21
Figura 8. Montaje de la prueba de flexión con dos puntos de apoyo al ala con todas las venaciones.	22
Figura 9. Prueba de flexión en progreso en ala con todas las venaciones.	23
Figura 10. a. Montaje de la prueba de flexión con un punto de apoyo, b. Ejecución de prueba de flexión con un punto de apoyo.	23
Figura 11. Graficas de los montajes físicos, a. flexión con tres puntos de apoyo b. flexión en voladizo	28
Figura 12. Desplazamiento del ala al ser sometida a la prueba de flexión con tres puntos de apoyo, a. ala con venas principales, b. ala con todas las venas, c. ala completa.	31
Figura 13. Nivel de riesgo del ala al ser sometida a la prueba de flexión con tres puntos de apoyo, a. ala con venas principales, b. ala con todas las venas, c. ala completa.	32
Figura 14. desplazamiento del ala al ser sometida a la prueba de flexión en voladizo, a. ala con venas principales, b. ala con todas las venas, c. ala completa.	33
Figura 15. desplazamiento del ala al ser sometida a la prueba de	

flexión en voladizo, a. ala con venas principales, b. ala con todas las venas, c. ala completa. 34

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Registro de medidas generales de alas	24
Tabla 2. Prueba de flexión física con tres puntos de apoyo.....	26
Tabla 3. Prueba de flexión física voladizo	26
Tabla 4. Variables para hallar la condición estructural del ala en la prueba de flexión con tres puntos de apoyo	28
Tabla 5. Variables para hallar la condición estructural del ala con la prueba de flexión en voladizo.	29
Tabla 6. Variables para hallar la condición estructural del ala en la simulación de flexión con tres puntos de apoyo	31
Tabla 7. Variables para hallar la condición estructural del ala con la simulación de flexión en voladizo.....	33

RESUMEN

Las alas de libélula poseen una estructura que permite una relación altamente eficiente entre la resistencia y el peso, haciéndola un objeto de estudio ideal para su aplicación en diseños que necesiten dichas propiedades mecánicas. La presente investigación se desarrolló con el fin de generar conocimiento acerca de las relaciones morfológicas que pueden existir en el ala de la libélula y como estas intervienen o afectan su estructura. Mediante una etapa experimental se evaluarán las propiedades mecánicas de diferentes prototipos, con el objetivo de recopilar nueva información que puede ser usada en el ámbito del diseño. Se encontró que la venación es la característica que más influye en la resistencia estructural del ala ya que la distribución de estas le da una gran flexibilidad a el ala sin disminuir su resistencia a los pesos que se le aplican constante o esporádicamente.

PALABRAS CLAVE: Alas de libélula, relaciones morfológicas, morfometría geométrica, biomimética, morfología estructural.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación aborda la exploración de la relación existente entre las características morfológicas y la resistencia a esfuerzos mecánicos presentes en el ala de la libélula, ya que esta es un área de superficie grande respecto a los esfuerzos a los cuales está sometida constantemente y cuenta únicamente con un punto de apoyo. Lo cual pretende ser una oportunidad en el campo del diseño industrial para ofrecer diferentes alternativas en casos donde la disminución de peso en los diseños sea de alta importancia como por ejemplo lo es en los casos de estructuras efímeras.

Esto se pretende hacer por medio de una basta investigación sobre las características previamente estudiadas de las alas de la libélula, así mismo se pretende hacer una observación de diferentes especímenes de la misma familia para tomar pruebas dimensionales de las alas y posteriormente categorizar estas mismas por sus medidas generales. A partir de la observación se pretende hacer un modelo digital para realizar pruebas de elementos finitos en el ala, variando las características previamente visualizadas en ella, tales como el tipo de venación y los polígonos que la componen, esto con el fin de definir los patrones que tengan mejor relación resistencia/peso para propiciar soluciones más eficientes a la hora de aplicar los hallazgos encontrados en esta investigación, al campo del diseño industrial.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Tema general del proyecto

Biomimética. Desarrollo de una posible solución a la necesidad de estructuras livianas y resistentes, a partir de la observación y estudio de la relación de las propiedades mecánicas y morfológicas del ala de la libélula

1.2 Características generales del proyecto de investigación

Este proyecto está enmarcado en una investigación de tipo experimental, en el cual se realiza en análisis de las características morfológicas del ala de la libélula y su relación con el comportamiento mecánico de estas. Con lo anterior se pretende plantear una posible solución a la necesidad de metodología que permitan el diseño de estructuras resistentes y livianas.

1.3 Descripción del problema de investigación identificado

Las estructuras ligeras son utilizadas constantemente en espacios arquitectónicos modernos ya que permiten ahorrar material y disminuir el peso propio que deben soportar, mejorando su resistencia. Sin embargo, algunas de estas estructuras presentan problemas como el pandeo y requieren de un diseño estructural riguroso que evite esta clase de daños; resultando en una estructura altamente compleja, debido a esto, el transporte de estas estructuras implica un alto gasto de combustible debido al uso de camiones de gran volumen.

Se han planteado diferentes alternativas para dar solución a esta problemática, dentro de las cuales se encuentran sistemas desarrollados a partir de análisis estructural de sistemas naturales. Sin embargo, muchas de las alternativas planteadas surgen a partir del análisis estructural de sistemas vegetales y el análisis de sistemas presentes en insectos no ha sido abordada de manera sistemática para atender el problema planteado.

Si bien, se han realizado estudios relacionados con el análisis morfológico del ala de la libélula, estos no han sido enfocados a la aplicación de sistemas como los que se plantean en este trabajo. Existe una carencia de información en cuanto a la morfología estructural del ala de la libélula y los esfuerzos que esta soporta cuando está en reposo. Sus características morfológicas la dotan de propiedades mecánicas que la hacen una estructura estable y resistente, sin embargo, los estudios existentes se enfocan en sus características dinámicas y dejan de lado su análisis como estructura estática. Estas propiedades mecánicas podrían abrir nuevos campos de desarrollo en el diseño industrial solucionando problemáticas en la creación de estructuras livianas y fuertes.

1.4 Pregunta e hipótesis de investigación

¿Qué relación existe entre las características morfológicas y la resistencia mecánica del ala de la libélula?

1.5 Elementos del problema de investigación

Esta investigación está orientada al área del diseño de la biomimética ya que recolecta información de un referente biológico para ser aplicado al diseño; en este caso de estudio se eligió el ala de libélula por sus características estructurales que la dotan de estabilidad y presentan una buena relación entre sus propiedades mecánicas y su peso, hasta el momento los estudios acerca de estos aspectos han tenido un enfoque biológico y son dirigidos a un público académico especializado. Mediante el análisis de las características estructurales del ala de la libélula enfocado en su posible aplicación al diseño industrial y la arquitectura se busca generar conocimiento sobre la construcción de estructuras livianas con un punto de apoyo.

Para el desarrollo del proyecto es necesaria una comprensión y análisis de los comportamientos mecánicos del ala de la libélula y su conexión e interrelación, además del entendimiento de los conceptos que abordan la temática alrededor del proyecto tales como la biomimética, la morfometría geométrica y el diseño estructural con el objetivo de establecer datos concluyentes en cuanto al funcionamiento estructural del ala por medio de análisis de elementos finitos, desarrollados en un modelado en 3D.

1.6 Limitaciones de la investigación: alcance y riesgos

Con la presente investigación se busca analizar los patrones presentes en el ala de la libélula, pasando de lo macro a lo micro, con el propósito de identificar cómo dichos patrones intervienen en las propiedades mecánicas del ala, específicamente la resistencia. También se busca comprender los conceptos que son de importancia para contextualizar la morfología del ala en el campo del diseño industrial. Adicionalmente se espera identificar el tipo de material cuyas propiedades se asemejan a las propiedades mecánicas del ala mediante experimentaciones cuyos resultados se recopilarán con la intención de generar información que puede ser posteriormente aplicada en el ámbito del diseño y la arquitectura.

2. JUSTIFICACIÓN

Estudiar el comportamiento estructural del ala de la libélula podría permitir un avance para el diseño, permitiendo la solución de problemas estructurales, por ejemplo, en donde se requiera abarcar una gran área con poco peso y alta resistencia. En el diseño de mobiliario, estanterías y estructuras efímeras se podría encontrar una gran oportunidad desde la biomimética de las alas de la libélula.

La abstracción de patrones geométricos de la estructura del ala de la libélula posiblemente contribuya a la optimización y mejora de la relación entre resistencia y peso de una estructura, permitiendo la generación de estructuras de bajo peso, ya sea para estructuras no permanentes, mobiliario, techos, entre otros.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Marco teórico

Las alas de las libélulas y su comportamiento ante esfuerzos mecánicos han sido un tema de estudio desde años atrás gracias a la complejidad morfológica, el comportamiento dinámico durante el vuelo y la estructura que presentan. En una primera exploración. Se hace un acercamiento general a la libélula como un sistema y se explican las partes de las alas de la libélula y las funciones que cumple cada una (Chen, 1953).

3.1.1 Características del ala de libélula

Las alas son transparentes y están soportadas por numerosas venas que forman una red. Las libélulas poseen alas anteriores y traseras. Las primeras son más anchas en el nodo que se encuentra en el medio del margen anterior del ala. Las alas traseras son ligeramente más cortas y aproximadamente una quinta parte más anchas que las alas anteriores (la porción más ancha de la primera es un poco basal al nodo que está situado en los dos quintos basales del ala).

Los dos pares de alas tienen un estigma del mismo tamaño, forma y color. Es un área engrosada cerca del vértice del ala, de color marrón oscuro o negro, alargada, aproximadamente cuatro veces más larga que ancha, con sus lados más cortos oblicuos y paralelos entre sí; con sus lados más largos cóncavos, superando aproximadamente seis células; y con una vena fuerte, que se extiende hacia abajo desde su lado basal. Todo lo anterior se puede observar en la *Figura 1*.

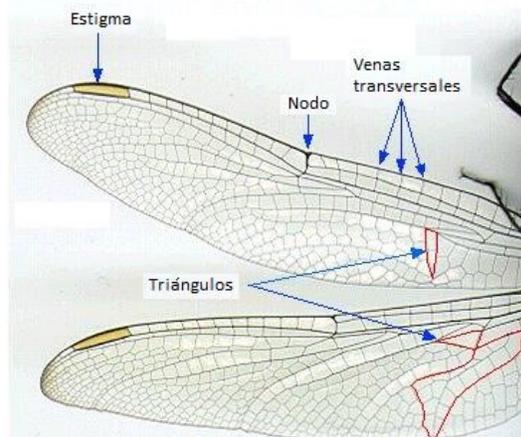


Figura 1. Caracterización de las partes del ala de la libélula. Chen, C. H. (1953).

Las principales venas longitudinales son costa, subcosta, radio (4 ramas con 2 intercalares), medios (una sola vena), cubito posterior y anal. La costa (C) (ver *Figura 2*. color rojo), o veta costal, es una veta simple y fuerte que, según Fraser (1948), se extiende desde la base del ala hasta el nódulo. El subcosta (Sc) (ver *Figura 2* *Figura 2*. color naranja) es una veta larga posterior a la costa. Según Fraser (1948), su curso es desde la base del ala hasta el nodus, donde hace una curva distinta hacia adelante, hacia el margen costal, a cuyo nivel se endereza nuevamente a lo largo del margen de la mitad apical del ala.

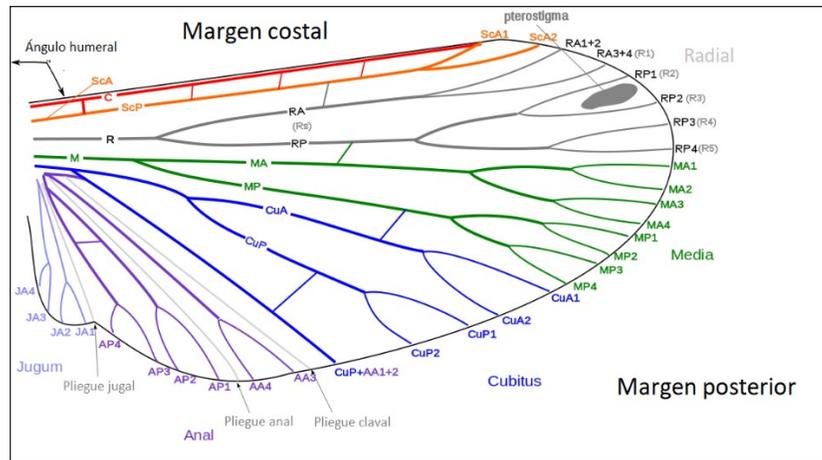


Figura 2. Sistema de venación según sistema de Comstock-Needham. Fraser (1948)

En una ampliación del conocimiento a nivel local del ala de la libélula se encontró que la estructura de venas del ala de la libélula tiene una forma óptima la cual se adapta a las fuerzas que actúan sobre ella en cada una de sus locaciones (Sudo & Tsuyuki, 1999). Se realizaron estudios enfocados en la distribución de las venas a través del ala en busca de patrones geométricos y como resultado de esta búsqueda se encontró que el ala se encuentra dividida en espacios por las venas, se examinó el número de vértices que tienen dichos espacios, la cantidad de vértices en los espacios más común fue 6, seguido por 5. También se realizó una cuenta del número de espacios en un área determinada, los resultados mostraron que los espacios de mayor tamaño son menos frecuentes, y los espacios pequeños son relativamente abundantes (Sudo & Tsuyuki, 1999)

Posteriormente se llegó a un nivel de estudio microscópico enfocado en las formas geométricas encontradas en el ala, incluso se realizaron análisis sobre los ángulos de dichas formas y su relación con la estructura en conjunto y se halló que las venas secundarias soportan las venas principales. En adición, los ángulos formados por venas de radio cercano a $dm/ds=1$ (cuando los diámetros de las venas son iguales) están distribuidas a aproximadamente $\Theta=2\pi/3$ (120°), siendo Θ el ángulo de bifurcación, resultando en una estructura hexagonal, tipo panal de abejas como está explicado en la *Figura 3*.

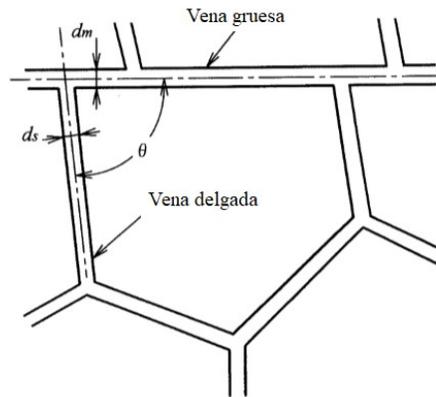


Figura 3. Definición del ángulo de bifurcación. Sudo & Tsuyuki (1999)

Años después, se realizó un estudio de las alas de los insectos en general, en el cual se abordó la relación entre el patrón de venación y la flexibilidad del ala midiendo la rigidez a la flexión de las alas. En este estudio se hicieron hallazgos tales como que el análisis de elementos finitos de un ala de insecto muestra que esta anisotropía estructural se debe a una característica de venación común de las alas de los insectos: las venas de los bordes de ataque. La adición de venas de vanguardia al modelo aumenta drásticamente la rigidez a la flexión, generando una anisotropía en sentido longitudinal y el patrón de venación puede no afectar la rigidez general, pero podría influir en la variación de la rigidez a lo largo del ala (SA & TL, 2003). Así mismo se demostró que las alas de la libélula al ser altamente corrugadas aumentan la rigidez y la fuerza del ala de manera significativa, y da como resultado una estructura ligera con un buen rendimiento aerodinámico (Jongerus & Lentink, 2010)

Indagando sobre el grosor de la venación en el ala se encontró que hay un espesor decreciente de las venas y las membranas desde la raíz hasta la punta y desde la punta hacia el borde posterior" (Jongerus & Lentink, 2010) y que las venas y la membrana del borde posterior son, sin embargo, significativamente más delgadas que el resto del ala, lo que disminuye el efecto de la deformación local sobre la rigidez del ala, ya que equilibra su gran distancia relativa con respecto al centroide del ala". (Jongerus & Lentink, 2010)

A partir de eso, y bajo la misma línea de estudio, se le dio un enfoque diferente al tema, hallando que las alas de la libélula poseen una gran estabilidad y una gran capacidad de carga durante el vuelo de aleteo, planeo y vuelo estacionario. Los científicos han estado intrigados por ellos y han llevado a cabo investigaciones para aplicaciones biomiméticas. En

relación con la gran cantidad de obras en su aerodinámica de vuelo, pocos investigadores se han centrado en la estructura del ala del insecto y sus propiedades mecánicas. (Sun & Bhushan, 2012). Este documento se centra en los efectos de la estructura, las propiedades mecánicas y la morfología de las alas de libélula.

El estudio de las libélulas ha evolucionado conforme a la tecnología, pasando de lo macro a lo micro cada vez más específico, para entender el funcionamiento de un sistema es necesario comprender cada una de sus partes y el papel que desarrollan. Las alas de las libélulas son sistemas motores altamente especializados, los cuales están compuestos de una combinación de diversos componentes estructurales que son responsables de varios aspectos del funcionamiento del ala. Considerando la interacción compleja entre los componentes del ala, la modelación del ala como un todo sólo es posible con una inevitable simplificación. (Rajabi, Ghoroubi, Stamm, Appel, & Gorb, 2017)

3.1.2 Conceptualización de los elementos del problema

La libélula es un insecto que ha despertado el interés de los científicos y biólogos a través de la historia. Su tipo de vuelo presenta características aerodinámicas sobresalientes con respecto a otros insectos voladores; esto se atribuye a sus dos pares de alas, las delanteras se mueven a diferente velocidad que las traseras, capacidad que les permite permanecer inmóviles o desplazarse inmediatamente a gran velocidad" (Barrera-Escorcia, VilledaCallejas, & Lara Vásquez, 2006). Las alas de la libélula cumplen una función de desplazamiento por medio de la sustentación en el aire, además de esto las alas sirven como un método de identificación taxonómico, la venación que se presenta en el ala de una libélula determina su especie y ya que sus alas no son plegables se ubican dentro de los Paleópteros, es decir, "insectos primitivos" (Miller, 1987). Las alas salen hacia ambos lados del tórax de la libélula y están compuestas por dos elementos de forma general, las venas y la membrana, los músculos no están unidos directamente a las alas, sino al "nodo", que corresponde a la parte superior de la caja torácica y que a su vez está unida al borde de las alas que se proyectan hacia fuera. Las alas tienen una consistencia membranosa, hialina, altamente nervadas, y en algunos casos, presentan grandes áreas pigmentadas o coloreadas; en ellas se observa una marcada tendencia al angostamiento en la base de las alas (Barrera-Escorcia, Villeda-Callejas, & Lara Vásquez, 2006) La variación en el espesor, tanto de venas como membranas, proporciona un cambio en las propiedades mecánicas en diferentes zonas del ala, lo cual genera una buena resistencia a las condiciones exteriores.

La naturaleza se ha encargado de resolver diferentes problemáticas morfológicas en el mundo objetual, las cuales pueden ser potencialmente innovadoras. La biomimética responde a la adaptación de una función o forma, a distintos entornos y bajo requisitos

diferentes, posibilitando la traducción de soluciones de un ser vivo para varios problemas técnicos o de varios seres para un problema genérico aplicable a varios productos. (López Forniés, 2012)



Figura 4. Estructura basada en la tela de araña, diseñada por el arquitecto Dennis Dollens.

Existen esencialmente dos procesos de diseño biomimético. Los procesos dónde el diseño se inspira en la biología y ante un problema de diseño se emplean referentes de la naturaleza para dar una solución. Y los procesos de investigación biológica que producen conocimiento científico con valor añadido, que permiten desarrollarlo y traducirlo a soluciones aplicables en el ámbito artificial. (López-Forniés, 2014)

A su vez, durante décadas las alas de las libélulas se han estudiado con el propósito de generar conocimiento en el ámbito científico y con aplicaciones en el campo de la aerodinámica, sin embargo, desde el diseño aún no existe una aproximación a este insecto por medio de la biomimética; existen diversos métodos para abstraer y analizar la forma y los sistemas biológicos, uno de los estudios más importantes que se ha llevado a cabo desde los inicios de la biología, es la descripción anatómica y morfológica de los seres vivos con la finalidad de analizar diferencias entre especies y dentro de una misma especie (Adams, Rohlf, Slice, 2013). En sus orígenes, la morfometría utilizaba variables lineales como medidas, distancias, ángulos o proporciones; a partir de estas medidas, se obtenía un conjunto de datos que se analizaban por métodos estadísticos. (Galán, 2015) Los resultados se expresaban como un conjunto de coeficientes y gráficas a través de los cuales las variaciones de tamaño y forma eran difíciles de interpretar, a este enfoque se le llama actualmente morfometría tradicional (Rohlf y Marcus, 1993; Zeldicht et al., 2004).

Debido a las dificultades y limitaciones de la morfometría tradicional, a finales del siglo XX surgió la morfometría geométrica, que ha sido descrita como “una fusión empírica de la geometría con la biología” (Bookstein, 1982), ya que analiza la forma de los organismos o

de alguna de sus estructuras, considerando el espacio geométrico y empleando métodos estadísticos multivariados.

Para entender la morfometría geométrica se deben tener en cuenta diferentes conceptos, el principal es el concepto de forma, “propiedad geométrica de un objeto y que no toma en cuenta la escala, rotación y traslación” (Kendall, 1977; Bookstein, 1996), aunque debido al desarrollo y crecimiento de los seres vivos, en la morfometría geométrica no es posible analizar el tamaño y la forma por separado.

Otros dos conceptos importantes son la homología biológica, “hace referencia a la correspondencia biológica de determinadas estructuras o partes entre individuos” (Bookstein, 1986), y la localización geométrica refiriéndose a la “configuración espacial en dos o tres dimensiones de estas estructuras o partes” (Klingerberg y Monteiro, 2005).

La pregunta, entonces, que trataremos de responder con esta investigación se encuentra enfocada en el contexto relacional, que permita vincular diversos elementos aplicables al diseño, a partir del estudio de esta especie.

El establecimiento de relaciones es pertinente en los estudios morfológicos ya que permite delimitar, clasificar y analizar las partes que componen una unidad, lo que hace posible caracterizar cada parte o unidad funcional fundamental a partir de la comparación espacial entre sus longitudes (largo, ancho y profundidad) (Valencia, 2007). Se evidencia cómo el establecer relaciones se hace presente desde los primeros pasos del análisis morfológico, dando paso a una estructura de análisis más minuciosa. Más allá de servir como sistema de clasificación, el establecimiento de relaciones es constante durante todo el proceso de análisis, este tipo de estudio busca generar conclusiones a partir del relacionamiento de dichas variables en función de la forma.

Desde la perspectiva geométrica las relaciones son igual de pertinentes a la hora de enfrentarse a un problema o al análisis de una figura. El propósito de la visualización es detectar las propiedades geométricas presentes en una representación gráfica y con la exploración se busca descubrir propiedades o relaciones ellas que posteriormente posibiliten la identificación de relaciones de causa – efecto entre unas propiedades y otras (Camargo, Samper, & Perry, 2006).

Este relacionamiento de variables abre paso a un correcto proceso de diseño, durante el cual se debe crear la estructura y darle proporciones correctas, y para esto se debe seguir el camino intuitivo y el científico, tratando de lograr una combinación armónica entre la intuición personal y la ciencia estructural. El diseño es un proceso creativo mediante el cual

se definen las características de un sistema de manera tal que cumpla, en forma óptima, con sus objetivos previamente establecidos.

Si estudiamos todas las realizaciones de diseño estructural que el hombre ha hecho tomando como referencia a la naturaleza, podríamos agruparlas siguiendo el criterio de cuál ha sido la relación entre la referencia natural y su materialización en el mundo de lo artificial por medio de la morfología estructural. El primer nivel agruparía a todas aquellas realizaciones que por métodos de diseño convencionales llegan, sin saberlo, a soluciones que se encuentran en la naturaleza. Un segundo nivel analógico sería el llamado de inspiración, por estar basado en una concepción parcial de la globalidad del sujeto natural. El tercer nivel sería la trasposición, utilización de prototipos biológicos en el diseño de sistemas sintéticos creados por el hombre, o sea, se trata de estudiar los principios fundamentales de la naturaleza y llegar a la aplicación de esos principios y procesos a las necesidades humanas, entendiendo esto como el estudio de sistemas vivientes para aplicar a las tecnologías sus principios técnicos y procedimientos. Y por último la imitación total de la naturaleza (Songel, 1994)



Figura 5. Estructura efímera a base de tubos de cartón diseñada por el arquitecto Shigeru Ban.

La morfología estructural y la biomimética han dado soluciones a problemas tales como la resistencia de estructuras a esfuerzos mecánicos. Los elementos de una estructura deben de aguantar, además de su propio peso, otras fuerzas y cargas exteriores que actúan sobre ellos. Dependiendo de su posición dentro de la estructura los elementos o piezas del diseño soportan diferentes tipos de esfuerzos. Una fuerza sobre un objeto tiende a deformarlo, la deformación producida dependerá de la dirección, sentido y punto de aplicación donde esté colocada esa fuerza. Estas fuerzas tienen distintos orígenes:

- Debidas a su propio peso (toda estructura debe soportarse a sí misma).
- Debidas al peso, movimiento o vibraciones de los elementos que componen el conjunto del sistema técnico.

Por ejemplo, el cuadro de

una bicicleta no debe deformarse cuando una persona suba a ella o cuando coja baches mientras circula, etc. • Debidas a agentes externos al propio sistema técnico. Por ejemplo, un puente no debe caerse por el efecto del viento, el tejado de una casa no debería venirse abajo cuando se acumule nieve sobre él, etc. Normalmente, cuando construimos una estructura lo hacemos para que ésta no se deforme cuando está trabajando. Sin embargo, hay algunas estructuras que su trabajo lo ejercen deformándose y recuperando más tarde su forma original, pero esto es menos normal (Andalucía, 2011).

3.2 Estado del arte

Las alas de las libélulas han sido muy estudiadas desde el comportamiento dinámico, debido a las destrezas que tienen al volar, pero poco se ha explorado sobre su estructura y cómo estas se comportan desde un estado de reposo; a simple vista se puede decir que las alas presentan una estructura en voladizo, esto hace que todo el peso del ala este sujeto por un solo punto de apoyo, y a pesar del peso que tiene en la parte más externa de la misma esta no logra flectarse; además de esto, presenta un bajo peso y considerando que debe soportar las altas corrientes de aire, se podría destacar su resistencia.

En artículos recientes se destaca la alta especialización acerca de las alas de libélula, al punto de que existen investigaciones y proyectos enteramente dedicados a estudiar uno o varios componentes del ala, como es el caso de Rajabi et al. (2016) quienes en su artículo *“Basal Complex and Basal Venation of Odonata Wings: Structural Diversity and Potential Role in the Wing Deformation”* estudiaron el rol de componentes específicos del ala con respecto al funcionamiento en conjunto del ala. En este trabajo se buscó generar información sobre la fabricación de alas para vehículos micro aéreos y lo realizaron mediante la prueba de elementos finitos a un modelo 3D digital. Posteriormente los mismos autores realizaron un artículo titulado *“Dragonfly wing nodus: A one-way hinge contributing to the asymmetric wing deformation”* (Rajabi et al. 2017) el cual se centró exclusivamente en el nodo, destacando su función en el desempeño dinámico del ala. El mismo año la discusión en torno al nodo se amplía con la investigación de Sunami et al. (2017) titulada *“Deformation behavior of dragonflyinspired nodus structured wing in gliding flight through experimental visualization approach”* en la cual se estudia el funcionamiento del nodo en la estructura del ala, por medio de la experimentación con modelos mallados unidos por nodos. Los resultados muestran que los nodos tienen una gran influencia en la flexibilidad de la estructura, contribuye a que esta sea flexible sin perder fuerza y rigidez.

En cuanto a la morfología estructural de la venación Zhang et al. (2018) exploraron el papel de ciertas venas en la detención de las grietas en el ala en el artículo titulado *“In-situ*

mechanical test of dragonfly wing veins and their crack arrest behavior” mediante experimentaciones con muestras reales se analizaron distintas venaciones, entre ellas la costal, subcostal y el radio de una de sus venas. Se encontró que la vena costal es más rígida y resistente a la deformación que las otras venas.

Posteriormente Rudolf et al. 2019 estudian el comportamiento del ala en su contexto natural, el inicio y progreso del daño estructural en las alas de las libélulas en su artículo “On the fracture resistance of dragonfly wings” busca generar una relación entre la estructura del ala y el daño acumulado. El ala demostró ser excepcionalmente resistente al daño, con un área perdida no superior a 1.3% al terminar la temporada de vuelo. “La terminación de grietas, la desviación, la bifurcación y el puente son los mecanismos que aumentan la resistencia de las alas a la fractura”.

Las anteriores son investigaciones de las cuales es posible abstraer datos sobre las propiedades mecánicas del ala de la libélula y sus componentes e integrarlos a un análisis de estas propiedades centrado en lo estático y estructural.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Determinar la relación que existe entre las características morfológicas del ala de la libélula y su comportamiento estructural.

4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar morfológicamente el ala de una familia de libélulas.
2. Elaborar modelos físicos y digitales a partir de la geometría abstraída del ala.
3. Caracterizar mecánicamente los modelos físicos y digitales.
4. Definir las relaciones experimentales entre la forma y la función estructural.

5. METODOLOGÍA

5.1 Definición de la condición estructural natural del ala y sus variables formales.

Se realizó una visita al museo de historia natural del Instituto Tecnológico Metropolitano en el cual se nos fueron facilitadas nueve especímenes de odonatos, suborden anisóptera, pertenecientes a la familia libelulidae; se escogió esta familia debido a la abundancia de especímenes presentes en el museo. Se realizó una medición general de las alas para establecer una medida promedio que luego sería aplicada en la elaboración de modelos. Utilizando un microscopio trinocular Omax 40X-2500X y papel milimetrado se tomó registro de las medidas generales para su posterior digitalización. Se tomó la decisión de escoger el ala posterior para el estudio ya que esta ocupa una mayor área y posee una carga en el borde, el estigma.



Figura 6. Fotografía de ala posterior tomada en el ITM.

5.2 Elaboración de modelos físicos y digitales con geometría abstraída del ala.

Para la modelación se basó en las formas observadas desde la vista superior del ala, debido a las limitaciones temporales y de recursos se optó por centrar la experimentación en dos dimensiones, realizando una abstracción del ala resaltando las formas geométricas observadas anteriormente. Se realizó una digitalización del espécimen más aproximado a la medida promedio y luego se procedió a escalarlo para que encajara la medida deseada.

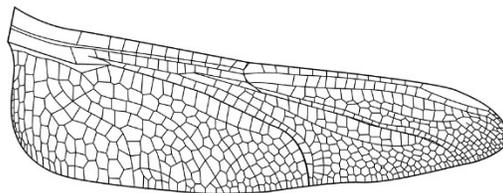


Figura 7. Digitalización del ala promedio en Illustrator.

A partir de esta digitalización completa se generó otro archivo, uno con las venas principales y secundarias, otro modelo con solo las venas principales, y por último un modelo sin venas; esto se hizo con el objetivo de realizar pruebas en cada uno de los modelos y de esta manera destacar la función estructural de cada tipo de vena y cómo estas afectan las propiedades mecánicas del ala en general, además de poder analizar la resistencia mecánica en comparación al peso.

Posteriormente se cortaron los modelos en MDF de 3 milímetros en una cortadora laser Co2. Cada modelo se cortó cuatro veces, las dos primeras para realizar una prueba de flexión con un punto de apoyo y las otras dos para realizar la misma prueba, esta vez con dos puntos de apoyo.

Digitalmente se realizó una extrusión de los archivos existentes en Rhinoceros, creando estructuras sólidas para posteriormente ser sometidas a pruebas de elementos finitos utilizando Scan&solve.

5.3 Experimentación sobre los modelos

Se realizó una prueba de flexión en las instalaciones de la UPB, en el laboratorio de resistencia de materiales, utilizando una máquina de prueba de compresión y flexión. Para la primera serie de pruebas se implementaron dos puntos de apoyo en el montaje del modelo y una carga en la zona central del ala para establecer sus propiedades de flexión.



Figura 8. Montaje de la prueba de flexión con dos puntos de apoyo al ala con todas las venaciones.

Esa prueba se llevó a cabo con dos modelos de cada tipo de corte, con la intención de establecer resultados concretos acerca del comportamiento de los grupos de venaciones.



Figura 9. Prueba de flexión en progreso en ala con todas las venaciones.

Posteriormente se procedió a realizar el montaje para las pruebas de flexión con un punto de apoyo, para esto se hizo necesario apilar una caneca y una mesa para elevar la muestra debido a la alta flexibilidad que presenta el material. Una vez elevado se posicionó un peso para sostener la muestra mientras se realiza la prueba.



a.



b.

Figura 10. Prueba de flexión a. Montaje de la prueba con un punto de apoyo, b. Ejecución de la prueba con un punto de apoyo.

5.4 Simulación sobre modelos digitales.

Con los modelos digitales realizados en Rhinoceros se hizo un análisis de elementos finitos, usando el programa Scan&Solve; de esta manera se pudo analizar el comportamiento de los diferentes modelos, con características diferentes a las de los modelos físicos.

Para estas pruebas se definió que el material a simular es aluminio 6061 y se sometió a una fuerza de 250 N. para que las pruebas salieran lo más parecidas posible, las restricciones y la carga se ubicaron de la misma manera que en los modelos físicos.

6. RESULTADOS

6.1 Definición de la condición estructural natural del ala y sus variables formales.

Mediante la tabulación de los datos se pudo observar que en 6 de los 9 especímenes estudiados se encuentra una relación entre ancho y largo, siendo el largo del ala equivalente a aproximadamente 3 veces su ancho.

Adicionalmente, se identificaron grupos de venaciones. Dentro de estos grupos se encuentran las venas principales, ubicadas principalmente en la zona anterior del ala poseen un grosor visiblemente mayor al de otras venas, estas forman cuadriláteros y se extienden hacia la zona posterior; a partir de este grupo de venas se compararon las otras venaciones, las venas secundarias son más delgadas y conforman polígonos irregulares que pavimentan el ala, a medida en que las venas se acercan al borde posterior del ala se presenta un mayor número de bifurcaciones, lo que resulta en formas geométricas con un mayor número de lados ver *Figura 11*.

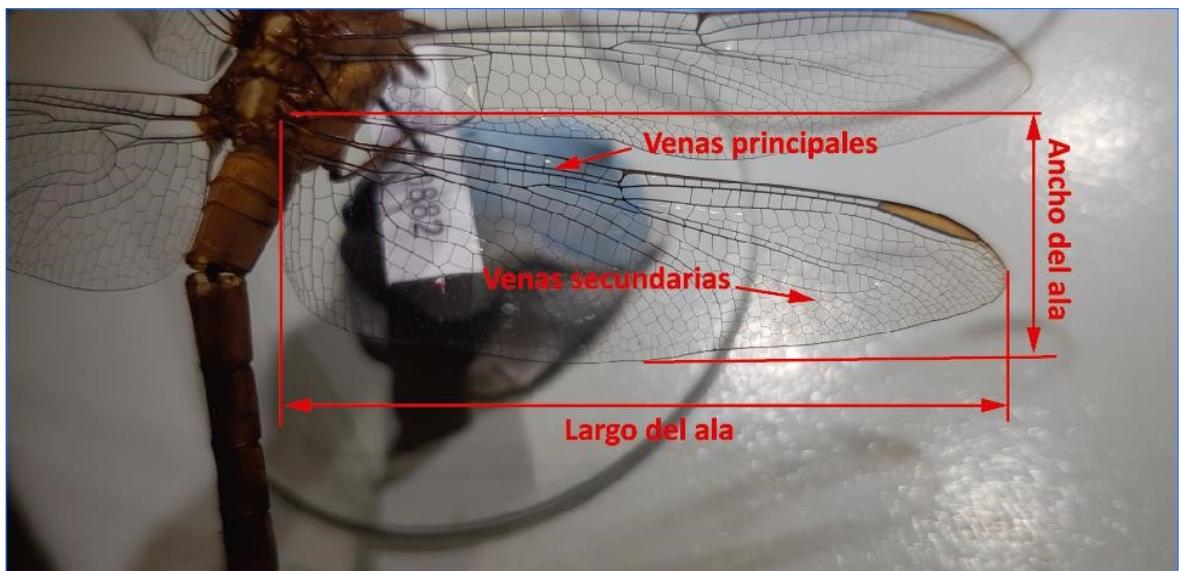


Figura 11. Clasificación de las venas primarias y secundarias, referencia de las medidas largo y ancho del ala.

Tabla 1. Registro de medidas generales de alas.

Espécimen	Largo (mm)	Ancho (mm)
1	39	13
2	24	1
3	31	1
4	4	13
5	29,5	9
6	28,5	9
7	3	1
8	44	15
9	26	8,5
Promedio	32,4	10,8

6.2 Elaboración de modelos físicos y digitales con geometría abstraída del ala.

Con la anterior información se definió la proporción del ala y se realizó la digitalización en escala 8:1 tomando como referencia la medida promediada del largo del ala, esta misma proporción se usaría para los modelos en la siguiente fase de experimentación.

La digitalización se realizó a partir de los registros fotográficos ver *Figura 12. (a)*, con el programa Adobe Illustrator CC 2018 se realizó la vectorización del ala y se definió el grosor de cada vena según su clasificación ver

Figura 12. (b) y *(c)*, a partir de esta estructura se realizaron los modelos tridimensionales como se muestra en la *Figura 12. (d), (f)* y *(g)* los cuales se sometieron a una serie de pruebas y simulaciones en programas de modelado en la siguiente fase de experimentación.

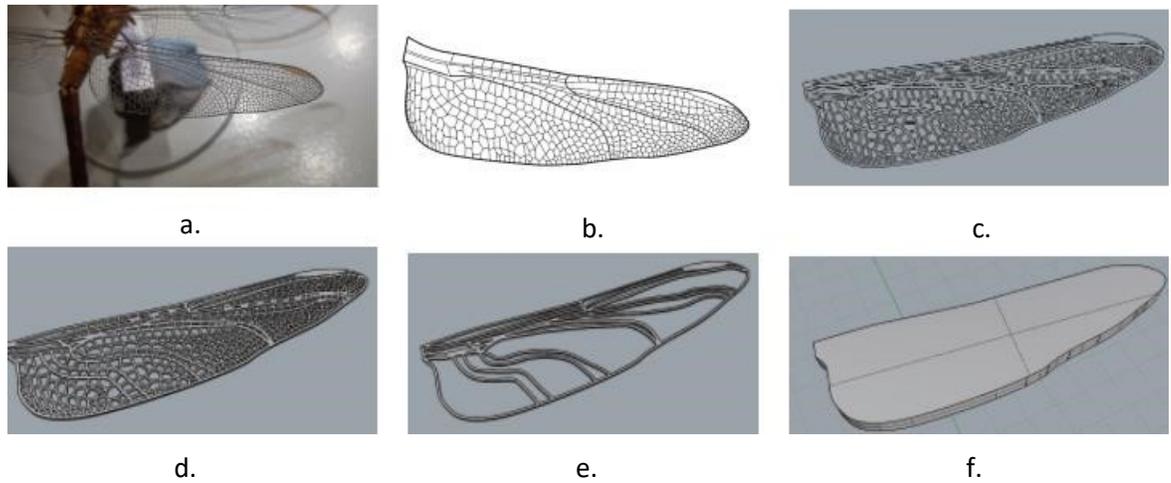


Figura 12. Proceso de digitalización y modelado del ala, (a) calco de la fotografía (b) vectorización y trazo en líneas (c) grosor de las venas dependiendo de su clasificación (d) extrusión del ala con las venas completas (e) extrusión del ala con venas principales (f) extrusión del ala completa.

6.3 Experimentación sobre los modelos

Las pruebas de flexión en voladizo y con tres puntos de apoyo se realizaron por duplicado para verificar el comportamiento de cada tipo de modelo ver Figura 13 , como está consignado en las tablas de resultados de dichas pruebas, el cambio entre estos duplicados resultó ser mínimo, por lo que no se hizo necesario realizar pruebas adicionales.

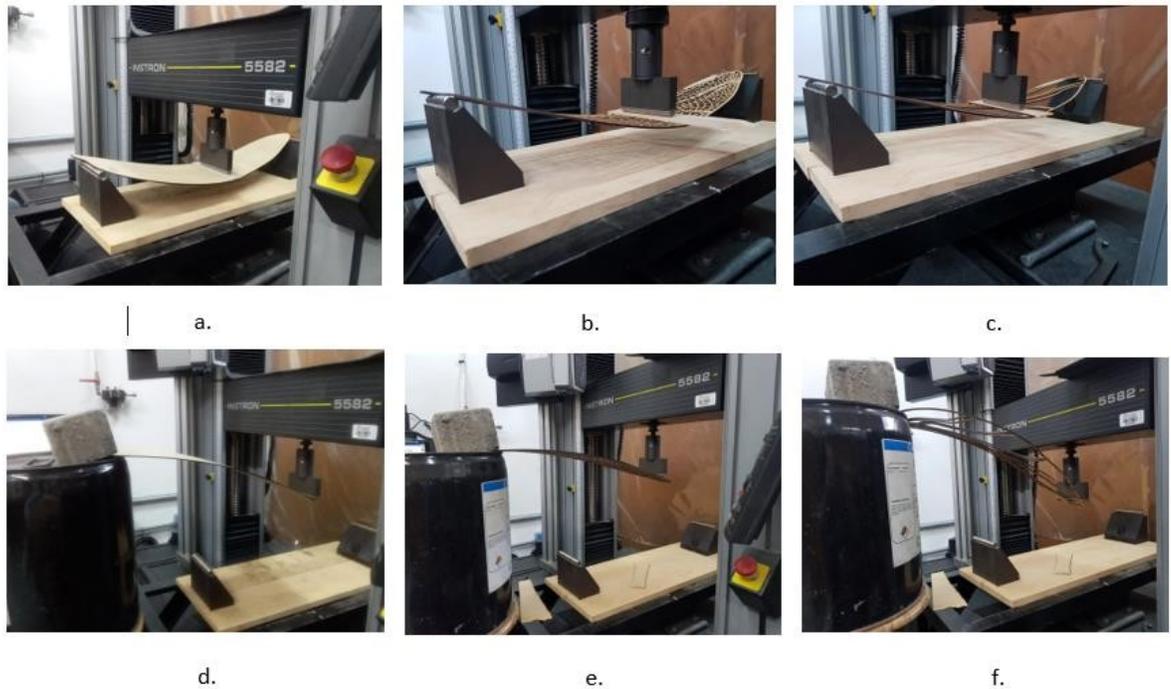


Figura 13. Montajes de las pruebas físicas, (a) prueba de tres puntos de apoyo ala completa. (b) prueba de tres puntos de apoyo ala con todas las venas. (c) prueba de tres puntos de apoyo ala con venas principales. (d) prueba en voladizo ala completa. (e) prueba en voladizo ala con todas las venas. (f) prueba en voladizo con venas principales.

Tabla 2. Prueba de flexión física con tres puntos de apoyo.

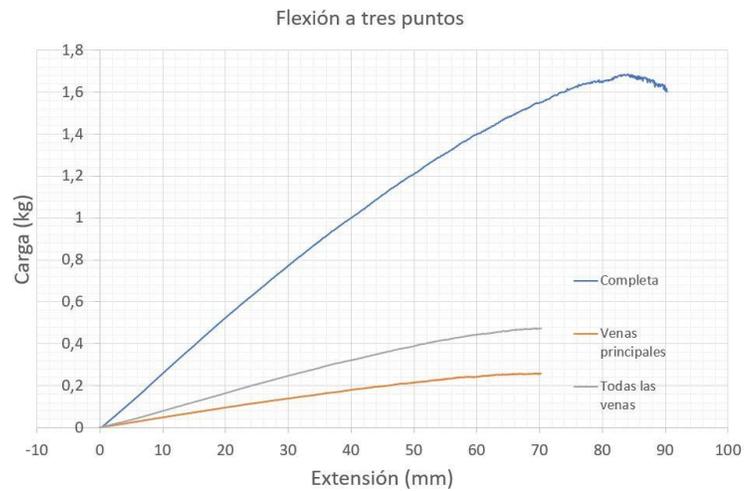
Prueba de flexión con 3 puntos de apoyo			
	Etiqueta de la probeta	Carga de flexión Maximum Flexure stress (gf)	Extensión por flexión Maximum Flexure strain (mm)
1	Venas principales 01	259,30	70,191
2	Venas principales 02	216,82	70,401
3	Todas las venas 01	401,41	70,300
4	Todas las venas 02	474,01	70,245
5	Completa 01	1685,56	90,299
6	Completa 02	1689,75	90,237
	Media	248,62	125,666
	Desviación estándar	167,85	85,86

Tabla 3. Prueba de flexión física voladizo.

Prueba de flexión en voladizo			
	Etiqueta de la probeta	Carga de flexión Maximum Flexure stress (gf)	Extensión por flexión Maximum Flexure strain (mm)
1	Completa voladizo 02	387,68	257,013
2	Completa voladizo 01	469,39	263,198

3	Todas las venas Voladizo 01	101,44	234,928
4	Venas _principales	62,81	242,560
Media		732,77	196,372
Desviación estándar		756,24	82,80

A partir de estos datos se realizaron dos gráficas, una de cada tipo de montaje de la prueba, en donde se ilustra el comportamiento de cada tipo de ala comparativamente; debido a la poca diferencia entre las muestras duplicadas se tomó la muestra con los indicadores más altos de cada tipo de modelo para graficarlas en conjunto ver Figura 14.



a.

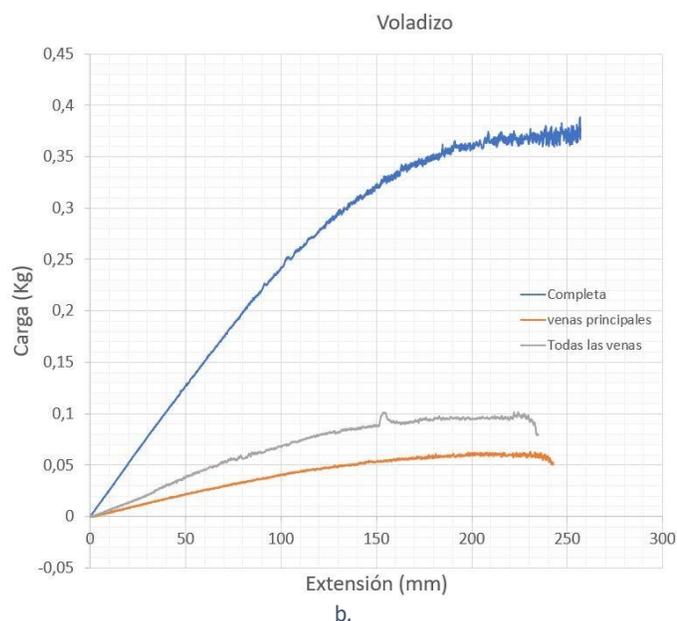


Figura 14. Graficas de los montajes físicos, (a) flexión con tres puntos de apoyo (b) flexión en voladizo.

Se observó que el ala completa, sin calado, presenta la mayor resistencia a la carga y la mayor flexibilidad por un margen considerable con respecto a las otras probetas, sin embargo, para establecer la muestra con mayor eficiencia estructural es necesario involucrar el peso de la muestra en el análisis, por esto se tabularon los resultados con variables que permiten analizar su condición estructural.

Tabla 4. Variables para hallar la condición estructural del ala en la prueba de flexión con tres puntos de apoyo.

Prueba de flexión con 3 puntos de apoyo			
Muestra	Carga máxima (Kg)	Extensión máxima (mm)	Resistencia (Kg)/ Peso (Kg)
Venas principales	0,259	70,191	$0,259/0,048 = 6,14$
Todas las venas	0,474	70,245	$0,474/0,098 = 4,83$
Completa	1,689	90,237	$1,689/0,173 = 9,76$

Tabla 5. Variables para hallar la condición estructural del ala con la prueba de flexión en voladizo.

Prueba de flexión en voladizo			
Muestra	Carga máxima (Kg)	Extensión máxima (mm)	Resistencia (Kg)/ Peso (Kg)
Venas principales	0,062	242,560	0,062/0,048 = 1,29
Todas las venas	0,101	234,928	0,101/0,098 = 1,03
Completa	0,469	263,198	0,469/0,173 = 2,71

Entre ambas pruebas se evidencia una diferencia, en términos generales, en cuanto a la resistencia en la carga máxima, siendo en el caso de las pruebas en voladizo mucho menor que con tres puntos de apoyo, sin embargo, se mantiene una relación en ambas pruebas de superioridad de carga por más del doble en el ala completa con respecto a las muestras con calado. Esta relación se hace más regular en la eficiencia estructural, pues se observa que la muestra completa posee dos veces más eficiencia estructural que las otras muestras.

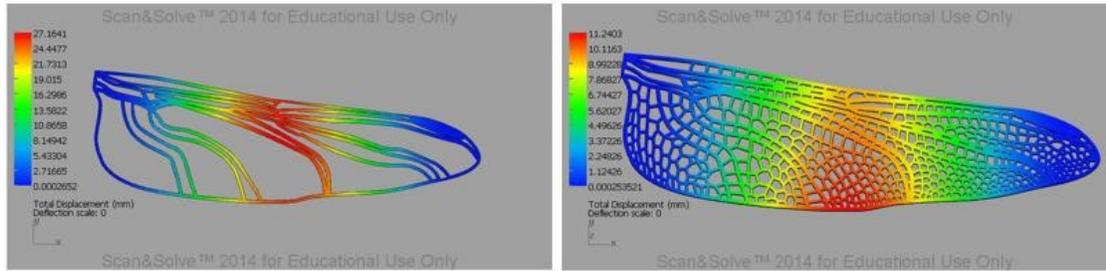
Al comparar entre sí las muestras caladas, “Venas principales” y “todas las venas” es posible establecer que la muestra con sólo las venas principales es más eficiente que la que posee la venación completa, ya que su relación entre resistencia y peso es mayor ; es posible inferir que las venas principales son fundamentales en cuanto a la repartición de cargas y su morfología, que parte de la zona anterior y se ramifica hacia la zona posterior con venas alargadas y gruesas, aumenta la eficiencia de la estructura; por otro lado, las venas secundarias cumplen una función en torno a la conservación de la forma, pues se observó que las muestras que poseen este tipo de venaciones sufrieron menos deformación.

6.4 Simulación sobre modelos digitales.

Además de realizar las pruebas físicas se realizaron simulaciones empleando el plugin Scan&solve del programa Rhinoceros, esto con el fin de poder someter el modelo a una carga mayor y con un material más resistente y estructural como lo es el aluminio 6061 (como referencia), tanto la simulación con tres puntos de apoyo y la de voladizo fueron sometidas a la misma carga (250 N).

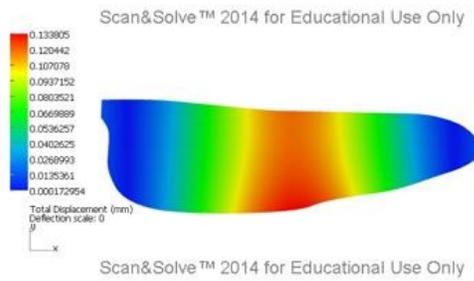
Para las pruebas con tres puntos de apoyo se partió el modelo en siete partes con el fin de poder ubicar las restricciones y la carga lo más similar posible a las pruebas físicas. Para esta simulación se tuvieron en cuenta dos resultados, el desplazamiento el cual se puede observar en la Figura 15. y el nivel de riesgo observado en la Figura 16, además en estas dos

figuras también se pueden observar las zonas críticas en donde puede fallar el ala, marcadas con rojo en cada modelo.



a.

b.



c.

Figura 15. Desplazamiento del ala al ser sometida a la prueba de flexión con tres puntos de apoyo, (a) ala con venas principales (b) ala con todas las venas (c) ala completa.

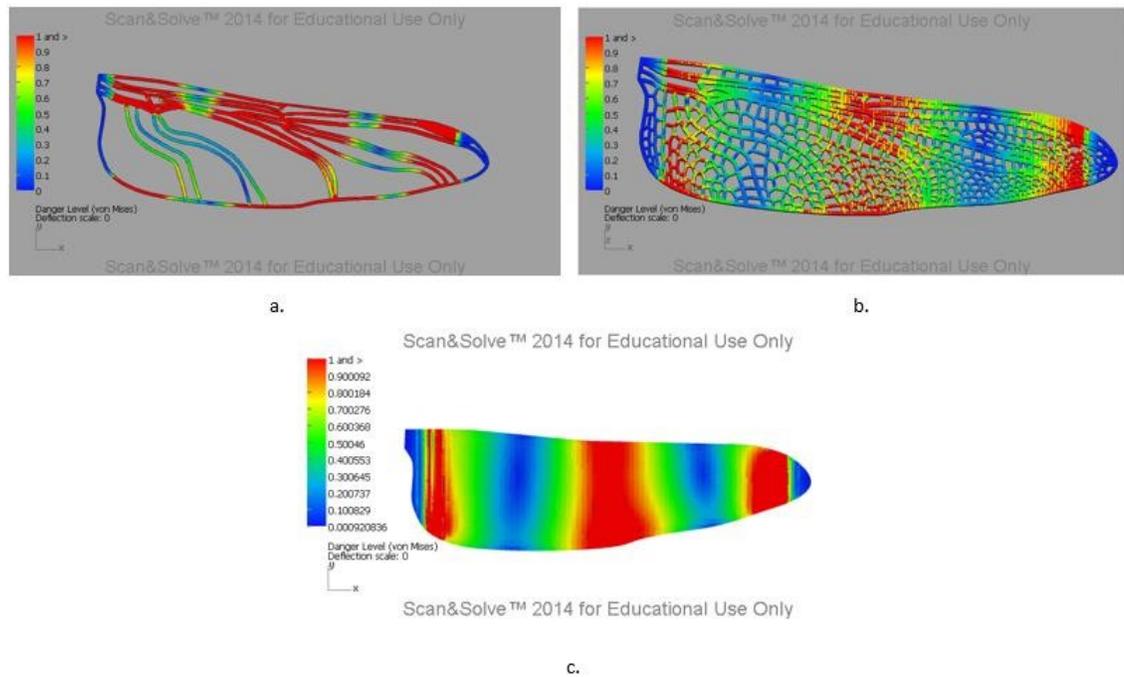


Figura 16. Nivel de riesgo del ala al ser sometida a la prueba de flexión con tres puntos de apoyo, (a) ala con venas principales (b) ala con todas las venas (c) ala completa.

Comparando estos resultados con las pruebas físicas se puede observar una tendencia en cuanto al desplazamiento y los puntos críticos del ala, encontrando que el ala sin venaciones es la que tiende a resistir más carga, sin embargo, se hace igualmente necesario analizar la resistencia obtenida con el peso, esto con el fin de encontrar cual es la eficiencia estructural de las diferentes alas.

Tabla 6. Variables para hallar la condición estructural del ala en la simulación de flexión con tres puntos de apoyo.

Simulación de flexión con 3 puntos de apoyo			
Muestra	Carga máxima (Kg)	Extensión máxima (mm)	Resistencia (Kg)/ Peso (kg)
Venas principales	25	0,2099	$25/184,344 = 0,1356$
Todas las venas	25	0,0881	$25/368,619 = 0,0678$
Completa	25	0,0118	$25/6,6725 = 3,7467$

Para la simulación en voladizo se realizaron los mismos pasos, pero en este caso el ala fue partida en tres partes para así poder ejercer la fuerza en el mismo punto que se ejerció en las pruebas físicas, en este caso solo se usó un punto de restricción, por ende, el desplazamiento Figura 17 y el nivel de riesgo Figura 18 lanzaron resultados diferentes, pero aun así siguen teniendo la misma tendencia que en las pruebas físicas.

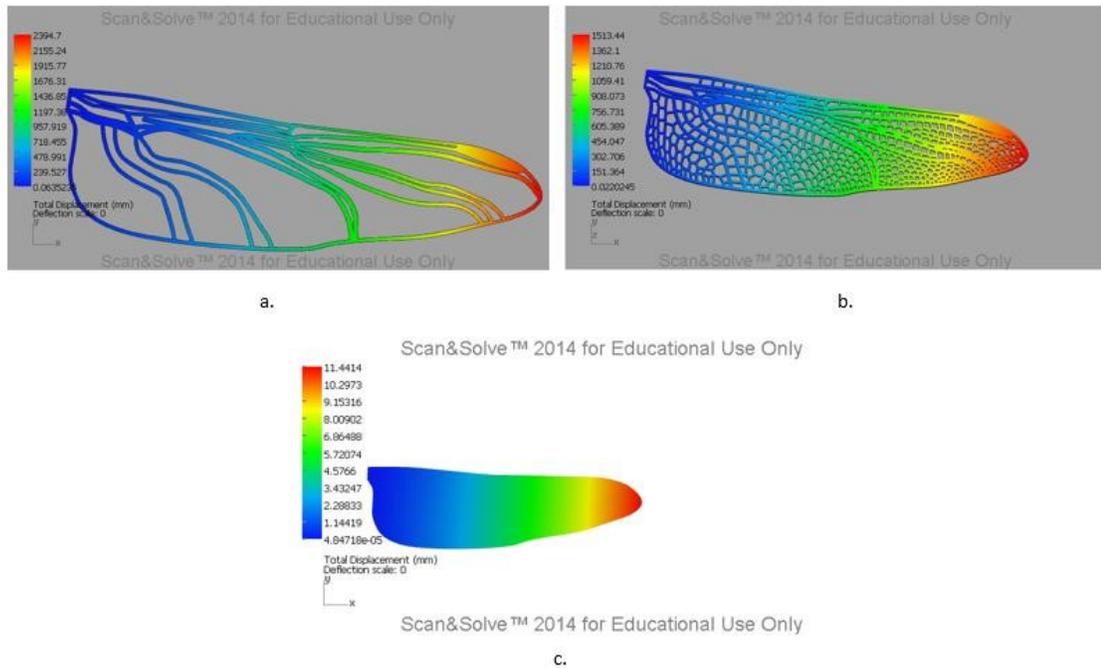


Figura 17. desplazamiento del ala al ser sometida a la prueba de flexión en voladizo, (a) ala con venas principales (b) ala con todas las venas (c) ala completa.

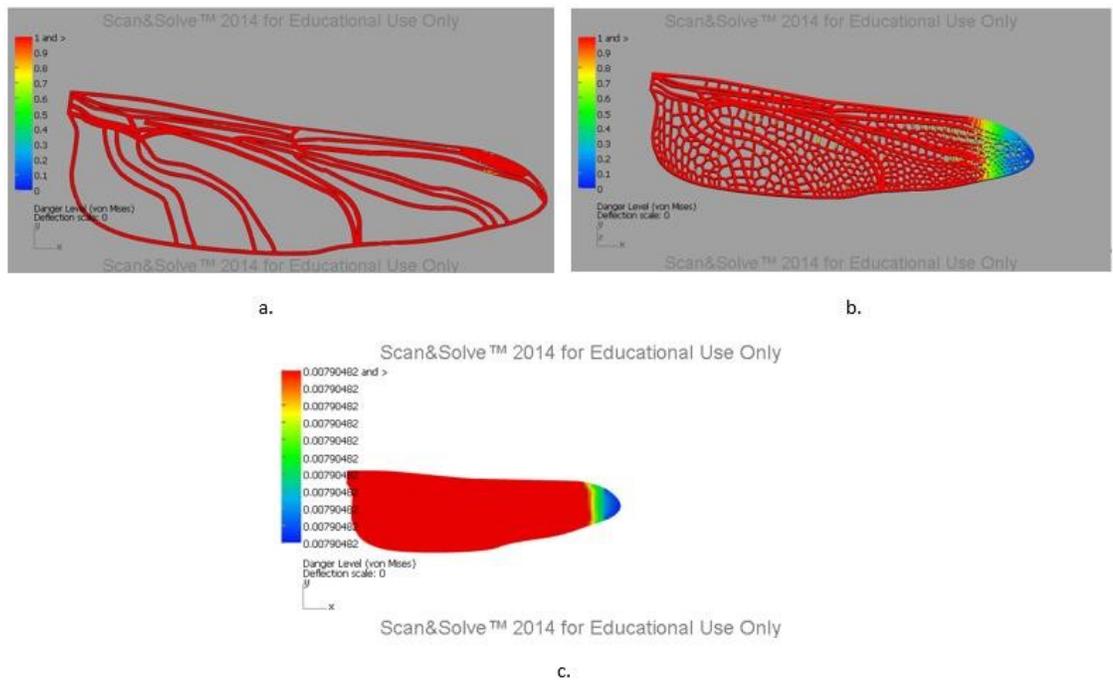


Figura 18. desplazamiento del ala al ser sometida a la prueba de flexión en voladizo, (a) ala con venas principales (b) ala con todas las venas (c) ala completa.

Tabla 7. Variables para hallar la condición estructural del ala con la simulación de flexión en voladizo.

Simulación de flexión en voladizo			
Muestra	Carga máxima (Kg)	Extensión máxima (mm)	Resistencia (Kg)/ Peso (KG)
Venas principales	25	0,2099	$25/184,344 = 0,1356$
Todas las venas	25	0,0881	$25/368,619 = 0,0678$
Completa	25	0,0118	$25/6,6725 = 3,7467$

7. CONCLUSIONES

- La estructura del ala de la libélula funciona como un sistema compuesto por grupos de venaciones, principales y secundarios, que poseen características formales como espesor, longitud y número de lados, estas variables definen la función que cumplen en el sistema, en el caso de las venas principales su función es la distribución de la carga, en las venas secundarias es la rigidez. Las venas principales poseen más rigidez debido a que estas conforman cuadriláteros en su mayoría, formas altamente compactas, lo que hace que aumente el nivel de peligro en esta área; por el contrario, las venas secundarias conforman polígonos de 5,6 y 7 lados, generando un mayor número de conexiones para la repartición del peso.
- Realizando una comparación entre los dos modelos calados es posible establecer que las venas principales contribuyen en mayor medida a la eficiencia estructural del ala, la ausencia del grupo de venación secundario parece ser de beneficio para la estructura debido a la disminución de peso que esto representa y el aumento en un 22% de eficiencia estructural.
- La prueba en voladizo representa la condición natural en la que se encuentra la estructura del ala, los resultados demuestran que la estructura con todas las venas puede soportar 87% más peso que la estructura con las venas principales, a pesar de tener un peso propio mayor, y por lo tanto poseer una menor eficiencia estructural, es posible observar que la combinación de estos dos grupos de venaciones resulta en una estructura altamente funcional para su condición natural.
- Aunque el material utilizado para las pruebas físicas no es el más común para aplicaciones industriales, se encontró una gran ventaja en cuanto a su eficiencia en este estudio y esto abre las puertas a la innovación de las aplicaciones del MDF en el tipo de estructuras propuestas en el proyecto.

8. RECOMENDACIONES

En caso de continuar con el proyecto investigativo se recomienda, en primer lugar, considerar aspectos formales del ala de la libélula como la corrugación y la membrana, ha sido comprobado que estas variables tienen un impacto importante en el funcionamiento dinámico de la estructura y su resistencia al contexto natural

en el que se encuentra, sin embargo, al realizar la investigación en cuestión se prescindió de estas variables debido a limitaciones temporales. En segundo lugar, se recomienda extender las pruebas físicas con la intención de explorar cómo se comportan distintos materiales y distintos procesos productivos al ser aplicados los patrones geométricos abstraídos del ala.

En cuanto a las pruebas digitales es aconsejable la elaboración de un modelo tridimensional que abarque el plano x, es decir, que replique la forma del ala aplicando corrugación y curvatura general, en este modelo las venas deben ser cilíndricas. Sometiendo este modelo a pruebas de resistencia mecánica se podrá obtener información más fiel al comportamiento real del ala. Finalmente, al obtener estos datos se podrá generar una base de información dirigida a diseñadores y arquitectos sobre formas, materiales y procesos productivos a tener en cuenta para generar una estructura eficiente basada en la biomimética.

9. REFERENCIAS

- Valencia, A. (2007). Elementos de la forma, la estructura y el movimiento. *Iconofacto*, 110.
- Camargo, L., Samper, C., & Perry, P. (2006). *Lecturas Matemáticas*. Bogotá: Sociedad Colombiana de Matemáticas.
- SA, C., & TL, D. (2003). Flexural stiffness in insects wings. *Journal of Experimental Biology*, 2979-2987.
- Jongerius, S., & Lentink, D. (2010). Structural analysis of a dragonfly wing. *Experimental Mechanics*, 1323–1334.
- Sun, J., & Bhushan, B. (2012). The structure and mechanical properties of dragonfly wings and their. *Comptes Rendus Mecanique*, 3-17.
- Hernandez, M., & Ávila, D. (2015). Diferencias interespecíficas y geográficas en los niveles de asimetría. *Poeyana*, 8-19.
- Sudo, S., & Tsuyuki, K. (1999). A study on the wing structure and flapping behavior of a dragonfly. *JSME International journal*, 721-729.
- Rajabi, H., Ghoroubi, N., Stamm, K., Appel, E., & Gorb, S. (2017). Dragonfly wing nodus: A one-way hinge contributing to the asymmetric wing deformation. *Acta Biomaterialia*, 330-338.

- Chen, C. H. (1953). *THE EXTERNAL MORPHOLOGY OF THE DRAGONFLY ONYCHOGOMPHUS ARDENS NEEDHAM*. WASHINGTON : THE SMITHSONIAN INSTITUTION.
- Galán, A. L. (2015). Morfometría geométrica: El estudio de la forma y su aplicación en biología . *Temas de Ciencia y Tecnología*, 53 - 59.
- López Forniés, I. B. (2012). Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético. *Universidad de Zaragoza, Prensas de la Universidad*.
- López-Forniés, I. (2014). Aproximación al diseño biomimético. Aprendizaje y aplicación. *red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal* .
- Songel, G. (1994). Naturaleza, diseño e innovación: propuesta metodológica . *Temas de disseny* .
- Miller, P. L. (1987). Dragonflies. *CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, NEW YORK, NY(USA)*. 1987.

RELACIÓN EXISTENTE ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS Y LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL ALA DE LA LIBÉLULA

*Valentina Trujillo, Mariana Castrillón, María Clara Serna
Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia
Valentina.trujillo@upb.edu.co, mariana.castrillon@upb.edu.co, mariac.serna@upb.edu.co*

Resumen

Las alas de libélula poseen una estructura que permite una relación altamente eficiente entre la resistencia y el peso, haciéndola un objeto de estudio ideal para su aplicación en diseños que necesiten dichas propiedades mecánicas. La presente investigación se desarrolló con el fin de generar conocimiento acerca de las relaciones morfológicas que pueden existir en el ala de la libélula y como estas intervienen o afectan su estructura. Mediante una etapa experimental se evaluarán las propiedades mecánicas de diferentes prototipos, con el objetivo de recopilar nueva información que puede ser usada en el ámbito del diseño.

Abstract

Dragonfly wings have a structure that allows a highly efficient relationship between resistance and weight, making it an ideal study object for application in designs that need such mechanical properties. The present investigation was developed in order to generate knowledge about the morphological relationships that may exist in the dragonfly wing and how they intervene or affect its structure. Through an experimental stage, the mechanical properties of different prototypes will be evaluated, in order to gather new information that can be used in the field of design.

Palabras Clave: Alas de libélula, relaciones morfológicas, morfometría geométrica, biomimética, morfología estructural. **1**

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación aborda la exploración de la relación existente entre las características morfológicas y la resistencia a esfuerzos mecánicos presentes en el ala de la libélula. Este tipo de ala se caracteriza por su eficiencia estructural, ya que presenta una buena relación entre su peso y la resistencia a esfuerzos mecánicos a los cuales se ve sometida; estas propiedades son atribuidas a sus diferentes características estructurales, tales como el tipo de venación, composición interna y la forma que adquiere al estar en presencia de diferentes

cargas; adicional a esto, el ala de la libélula cuenta con un solo punto de apoyo lo que la hace un excelente referente para solucionar problemas en el campo del diseño industrial e implementarla en productos tales como estructuras efímeras y estructuras livianas que precisen de un peso ligero sin comprometer sus propiedades mecánicas. Lo anterior pretende ser una oportunidad en el campo del diseño industrial para ofrecer diferentes alternativas en casos donde la disminución de peso en los diseños sea de alta importancia.

En estudios previos sobre el ala de la libélula se puede observar cómo esta ha sido profundamente analizada, hasta el punto de llegar en años recientes, en estudios como *“Basal Complex and Basal Venation of Odonata Wings: Structural Diversity and Potential Role in the Wing Deformation”* (2016) en el cual analizan el rol de componentes específicos del ala con respecto al funcionamiento en conjunto de ésta. También se ha llegado a estudiar componentes muy específicos del ala como en *“Dragonfly wing nodus: A one-way hinge contributing to the asymmetric wing deformation”* (Rajabi et al. 2017) en donde se centró exclusivamente en el nodo, destacando su función en el desempeño dinámico del ala. Entre estos estudios, sin embargo, se hace notable una carencia en cuanto al análisis del comportamiento estructural del ala en estado estático y la manera en que la morfología y patrones del ala influyen en este.

Para generar respuestas en este aspecto se pretende realizar una basta investigación sobre las características previamente estudiadas de las alas de la libélula, así mismo se llevará a cabo una abstracción geométrica, basada en la observación de diferentes especímenes de la misma familia para tomar pruebas dimensionales de las alas y posteriormente categorizar estas mismas por sus medidas generales. A partir de la observación se pretende hacer un modelo digital para realizar pruebas de elementos finitos en el ala y la elaboración de modelos físicos para someterlos a pruebas de resistencia; variando las características previamente visualizadas en ella, tales como el tipo de venación y los polígonos que la componen, esto con el fin de definir los patrones que tengan mejor relación resistencia/peso para propiciar soluciones más eficientes a la hora de aplicar los hallazgos encontrados en esta investigación, al campo del diseño industrial.

2 METODOLOGÍA

2.1 Definición de la condición estructural natural del ala y sus variables formales. Se realizó una visita al museo de historia natural del Instituto Tecnológico Metropolitano en el cual se nos fueron facilitadas nueve especímenes de odonatos, suborden anisóptera, pertenecientes a la familia libelulidae; se escogió esta familia debido a la abundancia de especímenes presentes en el museo. Se realizó una medición general de las alas para establecer una medida promedio que luego sería aplicada en la elaboración de modelos. Utilizando un microscopio trinocular Omax 40X-2500X y papel milimetrado se tomó registro de las medidas generales para su posterior digitalización. Se tomó la decisión de escoger el ala posterior para el estudio ya que esta ocupa una mayor área y posee una carga en el borde, el estigma.



. **Figura 1.** Fotografía de ala posterior tomada en el ITM.

2.2 Elaboración de modelos físicos y digitales con geometría abstraída del ala.

Para la modelación se basó en las formas observadas desde la vista superior del ala, debido a las limitaciones temporales y de recursos se optó por centrar la experimentación en dos dimensiones, realizando una abstracción del ala resaltando las formas geométricas observadas anteriormente. Se realizó una digitalización del espécimen más aproximado a la medida promedio y luego se procedió a escalarlo para que encajara la medida deseada.

A partir de esta digitalización completa se generaron dos archivos, uno con las venas principales y secundarias, y otro modelo con solo las venas principales; esto se hizo con el objetivo de realizar pruebas en cada uno de los modelos y de esta manera destacar la función estructural de cada tipo de vena y cómo estas afectan las propiedades mecánicas del ala en general.

Posteriormente, se cortaron los modelos en MDF de 3 milímetros en una cortadora laser Co2. Cada modelo se cortó dos veces, una para realizar una prueba de flexión con un punto de apoyo y otra para realizar la misma prueba, esta vez con dos puntos de apoyo.

Digitalmente se realizó una extrusión de los archivos existentes en Rhinoceros, creando estructuras sólidas que pueden ser sometidas a pruebas de elementos finitos utilizando este programa o en Solidworks.

2.3 Experimentación sobre los modelos

Se realizó una prueba de flexión utilizando una máquina de ensayos universal. Para la primera serie de pruebas se implementaron dos puntos de apoyo en el montaje del modelo y una carga en la zona central del ala para establecer sus propiedades de flexión. Posteriormente, se procedió a realizar el montaje para las pruebas de flexión con un punto de apoyo como se muestra en la **Figura 20**. Ambas pruebas se llevaron a cabo con dos modelos de cada tipo de corte, con la intención de establecer resultados concretos acerca del comportamiento de los grupos de venaciones.



a. *b.*
Figura 2. Prueba de flexión. (a) Montaje de prueba de flexión en voladizo. (b) Ejecución prueba de flexión con dos puntos de apoyo.

2.4 Simulación sobre modelos digitales.

Con los modelos digitales realizados en Rhinoceros se hizo un análisis de elementos finitos, usando el programa Scan&Solve; de esta manera se pudo analizar el comportamiento de los diferentes modelos, con características diferentes a las de los modelos físicos.

Para estas pruebas se definió que el material a simular es aluminio 6061 y se sometió a una fuerza de 250 N. para que las pruebas salieran lo más parecidas posible, las restricciones y la carga se ubicaron de la misma manera que en los modelos físicos.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al tabular las medidas generales de los especímenes observados en el laboratorio del ITM se encontró una relación entre el ancho y el largo del ala, siendo el largo equivalente a tres veces el ancho; se tomó esta relación para elaborar la abstracción digital del ala y posteriormente el corte de los modelos físicos. Mediante la observación de los especímenes se identificaron dos grupos de venaciones, como se observa en la **Figura 21**: las venas principales, ubicadas principalmente en la zona anterior del ala y poseen un grosor visiblemente mayor al de otras venas estas forman cuadriláteros y se extienden hacia la zona posterior; a partir de este grupo de venas se compararon las otras venaciones, las venas secundarias son más delgadas y conforman polígonos irregulares que pavimentan el ala, a medida en que las venas se acercan al borde posterior del ala se presenta un mayor número de bifurcaciones, lo que resulta en formas geométricas con un mayor número de lados.

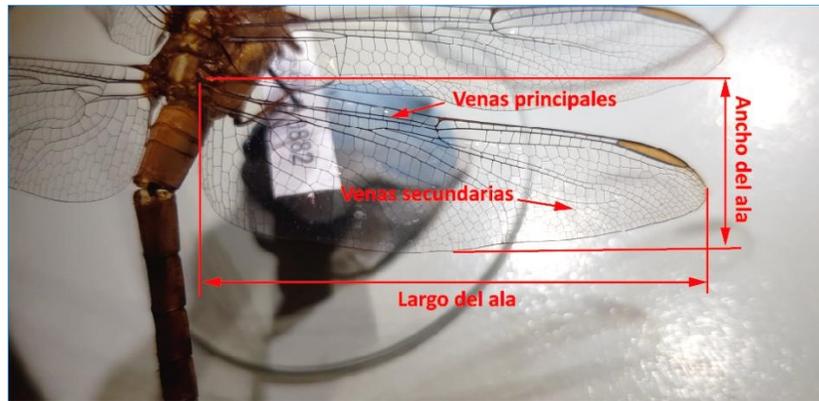


Figura 3. Clasificación de las venas primarias y secundarias, referencia de las medidas largo y ancho del ala.

Se seleccionó el ala del espécimen de tamaño más próximo al promedio observado y a partir de una imagen tomada de la vista superior se elaboró la digitalización del ala. Mediante esto se procedió a hacer tres modelos, uno con todas las venas, el segundo con las venas principales únicamente y el tercero es un sólido que tiene la forma del contorno del ala, ver **Figura 22**; esto con la intención de realizar pruebas de flexión que revelarían la función y propiedades mecánicas de cada grupo de venaciones.

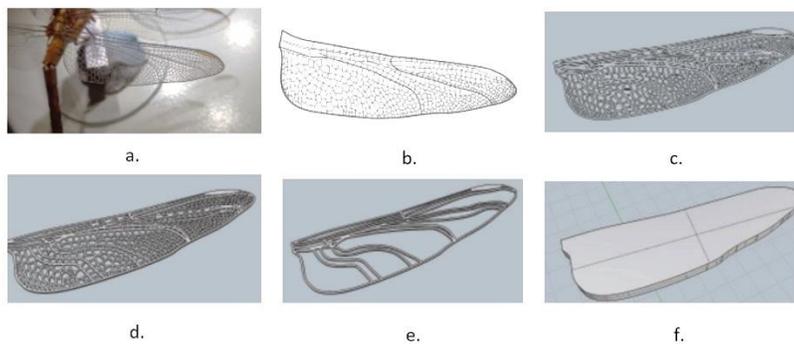
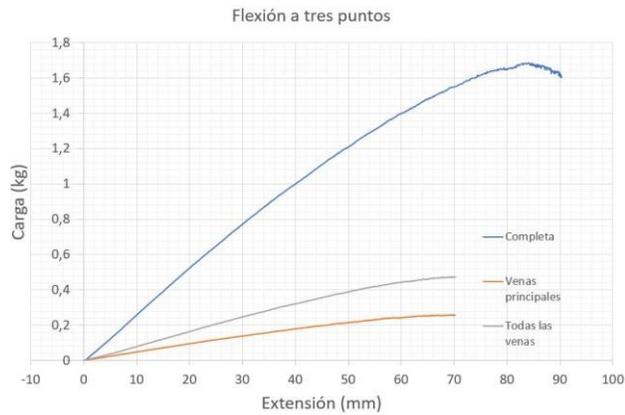


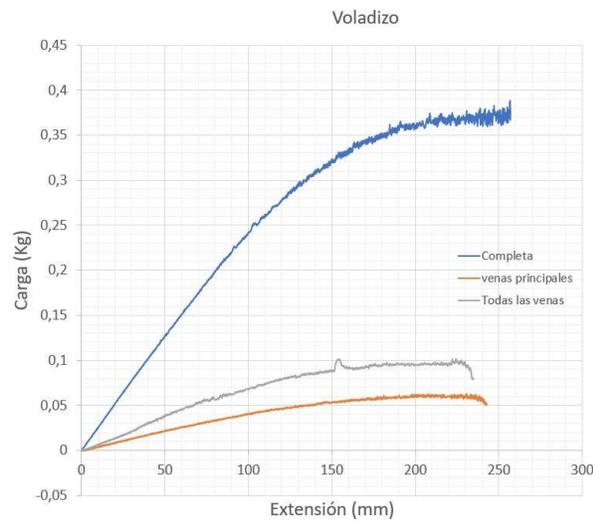
Figura 4. Proceso de digitalización y modelado del ala, (a) calco de la fotografía (b) vectorización y trazo en líneas (c) grosor de las venas dependiendo de su clasificación (d) extrusión del ala con las venas completas (e) extrusión del ala con venas principales (f) extrusión del ala completa.

Al realizar las pruebas de flexión de tres puntos de apoyo y en voladizo se ejecutaron con cada modelo por duplicado para corroborar los resultados, en todos los casos los resultados fueron similares por lo que no se hizo necesario realizar pruebas adicionales.

Ambas pruebas arrojaron valores correspondientes a cada modelo en donde se consigna su carga de flexión máxima y su extensión máxima. A partir de estos datos se realizaron dos gráficas una de cada tipo de montaje de la prueba, en donde se ilustra el comportamiento de cada tipo de ala comparativamente, ver **Figura 23**; debido a la poca diferencia entre las muestras duplicadas se tomó la muestra con los indicadores más altos de cada tipo de modelo para graficarlas en conjunto.



a.



b.

Figura 5. Graficas de los montajes físicos, (a) flexión con tres puntos de apoyo (b) flexión en voladizo.

Se observó que el ala completa, sin calado, presenta la mayor resistencia a la carga y la mayor flexibilidad por un margen considerable con respecto a las otras probetas, sin embargo, para establecer la muestra con mayor eficiencia estructural es necesario involucrar el peso de la muestra en el análisis, por esto se tabularon los resultados con variables que permiten analizar su condición estructural. Ver **Tabla 8.** y **Tabla 9.**

Tabla 1. Tabla de eficiencia estructural. Prueba de flexión con 3 puntos de apoyo.

Prueba de flexión con 3 puntos de apoyo			
Muestra	Carga máxima (Kg)	Extensión máxima (mm)	Resistencia (Kg)/ Peso (Kg)
Venas principales	0,259	70,191	0,259/0,048 = 6,14
Todas las venas	0,474	70,245	0,474/0,098 = 4,83
Completa	1,689	90,237	1,689/0,173 = 9,76

Tabla 2. Tabla de eficiencia estructural. Prueba de flexión en voladizo.

Prueba de flexión en voladizo			
Muestra	Carga máxima (Kg)	Extensión máxima (mm)	Resistencia (Kg)/ Peso (Kg)
Venas principales	0,062	242,560	0,062/0,048 = 1,29
Todas las venas	0,101	234,928	0,101/0,098 = 1,03
Completa	0,469	263,198	0,469/0,173 = 2,71

En ambas pruebas se evidencia una diferencia, en términos generales, en cuanto a la resistencia en la carga máxima, siendo en el caso de las pruebas en voladizo mucho menor que con tres puntos de apoyo, sin embargo, se mantiene una relación en ambas pruebas de superioridad de carga, por más del doble, en el ala completa con respecto a las muestras con calado. Al comparar entre sí las muestras caladas, es posible establecer que la muestra con sólo las venas principales es más eficiente que la que posee la venación completa, ya que su relación entre resistencia y peso es mayor en un 22% con tres puntos de apoyo, en voladizo no hay una diferencia tan marcada; es posible inferir que las venas principales son fundamentales en cuanto a la repartición de cargas y su morfología, que parte de la zona anterior y se ramifica hacia la zona posterior con venas alargadas y gruesas, aumenta la eficiencia de la estructura; por otro lado, las venas secundarias cumplen una función en torno a la conservación de la forma, pues se observó que las muestras que poseen este tipo de venaciones sufrieron menos deformación que la muestra de venas principales, aunque esta soportara casi el doble del peso.

En las pruebas digitales realizadas con el plugin Scan&solve del programa Rhinoceros, se evaluó la aplicación del material aluminio 6061 (como referencia), tanto la simulación con tres puntos de apoyo y la de voladizo fueron sometidas a la misma carga (250 N). Para esta simulación se tuvieron en cuenta dos resultados, el desplazamiento el cual se puede observar en las **Figura 24.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.,** y el nivel de riesgo observado en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

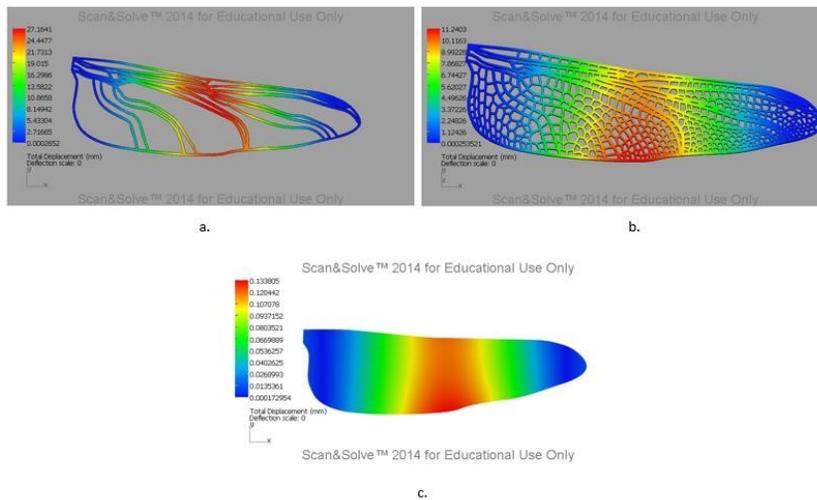


Figura 6. Desplazamiento del ala al ser sometida a la prueba de flexión con tres puntos de apoyo, (a) ala con venas principales (b) ala con todas las venas (c) ala completa.

Luego de revisar tanto pruebas digitales como físicas se puede observar que ambas arrojan resultados diferentes, debido a las propiedades del material; sin embargo, en todas las pruebas se conserva la misma tendencia, la muestra más eficiente estructuralmente es la muestra ala completa, seguida por el ala con venas principales.

4 AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a Alejandro Zuleta por encaminar el proyecto hacia su resultado final.

5 CONCLUSIONES

- La estructura del ala de la libélula funciona como un sistema compuesto por grupos de venaciones, principales y secundarios, que poseen características formales como espesor, longitud y número de lados, estas variables definen la función que cumplen en el sistema, en el caso de las venas principales su función es la distribución de la carga, en las venas secundarias es la rigidez. Las venas principales poseen más rigidez debido a que estas conforman cuadriláteros en su mayoría, formas altamente compactas, lo que hace que aumente el nivel de peligro en esta área; por el contrario, las venas secundarias conforman polígonos de 5,6 y 7 lados, generando un mayor número de conexiones para la repartición del peso.
- Realizando una comparación entre los dos modelos calados es posible establecer que las venas principales contribuyen en mayor medida a la eficiencia estructural del ala, la ausencia del grupo de venación secundario parece ser de beneficio para la estructura debido a la disminución de peso que esto representa y el aumento en un 22% de eficiencia estructural.

- La prueba en voladizo representa la condición natural en la que se encuentra la estructura del ala, los resultados demuestran que la estructura con todas las venas puede soportar 87% más peso que la estructura con las venas principales, a pesar de tener un peso propio mayor, y por lo tanto poseer una menor eficiencia estructural, es posible observar que la combinación de estos dos grupos de venaciones resulta en una estructura altamente funcional para su condición natural.
- Aunque el material utilizado para las pruebas físicas no es el más común para aplicaciones industriales, se encontró una gran ventaja en cuanto a su eficiencia en este estudio y esto abre las puertas a la innovación de las aplicaciones del MDF en el tipo de estructuras propuestas en el proyecto.

6 REFERENCIAS

- Valencia, A. (2007). Elementos de la forma, la estructura y el movimiento. *Iconofacto*, 1-10.
- Camargo, L., Samper, C., & Perry, P. (2006). *Lecturas Matemáticas*. Bogotá: Sociedad Colombiana de Matemáticas.
- SA, C., & TL, D. (2003). Flexural stiffness in insects wings. *Journal of Experimental Biology*, 2979-2987.
- Jongerius, S., & Lentink, D. (2010). Structural analysis of a dragonfly wing. *Experimental Mechanics*, 1323-1334.
- Sun, J., & Bhushan, B. (2012). The structure and mechanical properties of dragonfly wings and their. *Comptes Rendus Mecanique*, 3-17.
- Hernandez, M., & Ávila, D. (2015). Diferencias interespecíficas y geográficas en los niveles de asimetría. *Poeyana*, 8-19.
- Sudo, S., & Tsuyuki, K. (1999). A study on the wing structure and flapping behavior of a dragonfly. *JSME International journal*, 721-729.
- Rajabi, H., Ghoroubi, N., Stamm, K., Appel, E., & Gorb, S. (2017). Dragonfly wing nodus: A one-way hinge contributing to the asymmetric wing deformation. *Acta Biomaterialia*, 330-338.
- Chen, C. H. (1953). *THE EXTERNAL MORPHOLOGY OF THE DRAGONFLY ONYCHOGOMPHUS ARDENS NEEDHAM*. WASHINGTON : THE SMITHSONIAN INSTITUTION.
- Galán, A. L. (2015). Morfometría geométrica: El estudio de la forma y su aplicación en biología. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 53 - 59.
- López Forniés, I. B. (2012). Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético. *Universidad de Zaragoza, Prensas de la Universidad*.
- López-Forniés, I. (2014). Aproximación al diseño biomimético. Aprendizaje y aplicación. *red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*.
- Songel, G. (1994). Naturaleza, diseño e innovación: propuesta metodológica. *Temas de disseny*.