

# REPRESENTACIÓN GRÁFICA PARA EL ANÁLISIS MATEMÁTICO DE ESTRUCTURAS NATURALES

ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS  
FINITOS DEL CUERNO INFERIOR  
DE DYNASTES HERCULES  
(COLEOPTERA: INSECTA)<sup>1</sup>

Por:

MDI. **Miguel Uribe Becerra**<sup>2</sup>

Profesor del Departamento de Diseño  
Universidad del Valle

angel.uribe@correounivalle.edu.co

## Resumen:

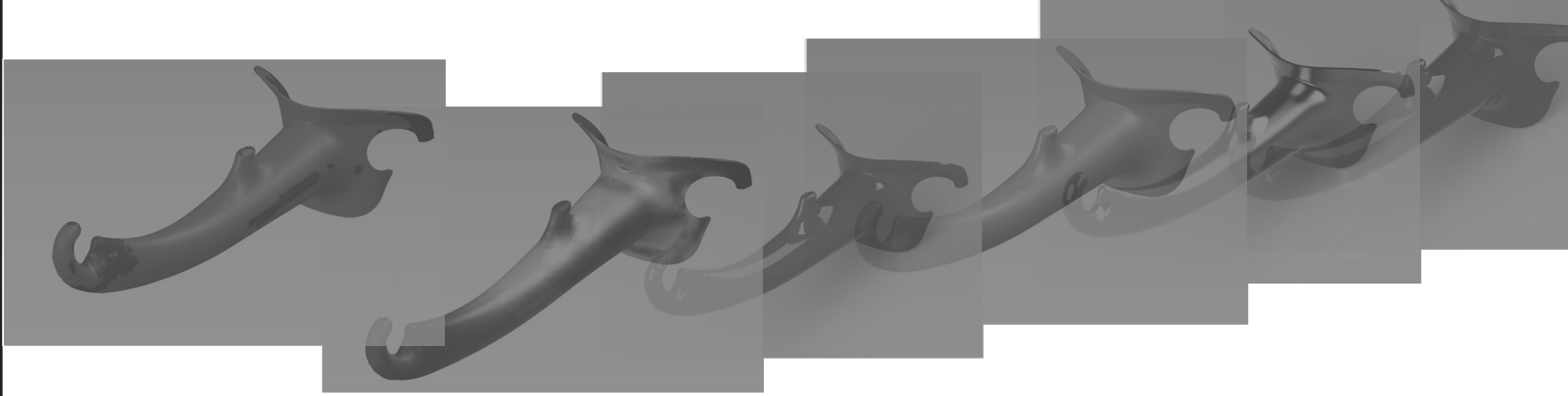
El diseño Industrial responde actualmente a una creciente preocupación por la reducción del impacto ambiental negativo en el planeta (devenido de sistemas de producción – comercialización), incorporando a su teoría y práctica pautas que consideran fundamental la problemática ambiental. Lo hace desarrollando métodos que promueven la reducción de desechos, el mejoramiento de la eficiencia de los productos, el uso racional de los recursos y, en general, la minimización de las prácticas que afectan la posibilidad del disfrute de los recursos para las futuras generaciones. En este sentido, la Biomimética se presenta como una disciplina que brinda herramientas metodológicas, conceptuales y prácticas para el estudio de las respuestas que la naturaleza da a problemas cotidianos, con el fin de encontrar alternativas para el desarrollo de productos alineados con los conceptos de sustentabilidad. El análisis gráfico del comportamiento estructural de los elementos naturales resulta ser un aporte en el propósito de acercar los análisis matemáticos complejos de las estructuras mediante la representación simple como una herramienta para evidenciar las bondades del diseño natural y avanzar en la aplicación práctica de sus principios.

**Palabras claves:** Biomimética, estructura natural, exoesqueleto, elementos finitos, diseño industrial.

## Abstract:

Industrial design currently answers a growing concern by the reduction of the negative environmental impact on the planet (become systems of production - marketing), incorporating his theory and practice guidelines that consider fundamental environmental issues and develop methods that promote waste reduction, improvement of the efficiency of the products, the rational use of resources and in general, the minimization of practices that adversely affect the possibility of the enjoyment of resources for future generations. In this sense, the Biomimicry is presented as a discipline that provides conceptual, methodological and practical tools for the study of the responses given by nature to everyday problems, in order to find valid alternatives for the development of products aligned with the concepts of sustainability. Graphic analysis of structural behaviour of natural elements turns out to be a contribution in order to approach the complex mathematical analysis of structures by means of the simple representation as a tool to demonstrate the benefits of the natural design and advance the practical application of its principles.

**Keywords:** Biomimicry, natural structure, exoskeleton, finite elements, industrial design.



### **¿Por qué analizar el comportamiento de las estructuras naturales?**

El desarrollo de productos mediante la aplicación de los principios abordados en la biomimética, se apoya en la potencialidad que surge del aprendizaje obtenido como fruto de la observación, análisis, síntesis y aplicación de las “lecciones” aprendidas del “diseño natural”; estos principios y métodos, brindan herramientas o estrategias de diseño que apuestan por una visión holística de los problemas abordados por el diseño, desde múltiples aspectos como los funcionales, estructurales, estéticos y medioambientales, ésto se justifica en el hecho de que el diseño natural ha encontrado a partir de siglos de evolución la manera perfecta de aprovechamiento de los materiales, eficiencia funcional y consideraciones de sostenibilidad; aspectos en los cuales el diseño debe hallar caminos de innovación.

Según lo plantea Alan Findelli (2001: 5-17), se advierte la necesidad de innovar en la investigación en diseño debido principalmente a la influencia que otras áreas del conocimiento y la misma práctica actual de la disciplina han tenido en la concepción de la labor del diseñador, dentro de estas áreas, las teorías sobre sostenibilidad y las evidencias sobre prácticas productivas nocivas y ambientalmente despreocupadas. El diseño industrial debe ligar a su práctica conceptos del desarrollo de una cultura material basada en la técnica, el arte, las ciencias humanísticas, la ingeniería y los aspectos medioambientales.

“Habiéndose vuelto la tecnología el agente más poderoso para el cambio en nuestra sociedad, las batallas decisivas serán ganadas o perdidas según que tomemos o no en serio, el desafío de reestructurar los ‘sistemas mixtos’ de la sociedad y la tecnología; es decir, los sistemas que conjuntamente constituyen la sociedad y la tecnología: sistemas de vida urbana, de control y conservación del ambiente, de comunicación y transporte, de educación y salud, de información y automatización” (Aposte, L., Berger, G., Briggs, A. y Michaud, G., 1979: 110 – 141).

Ésto presenta a la Biomimética y sus principios de diseño y análisis como recurso válido en búsqueda de respuesta de diseño consciente e integral y un camino valioso para la formulación de modelos prácticos de producción, uso y consumo.

Los objetos nacen y evolucionan en el tiempo a medida que aparecen y se desarrollan dos factores:

1. Los materiales con sus tecnologías de fabricación-transformación y,
2. Nuevos, reformados o renovados modelos mentales, culturales o cognitivos.

Es en referencia a esta dinámica de desarrollo de la técnica y el conocimiento donde el diseñador ha encontrado un espacio ideal de trabajo, aprovechando las cualidades y posibilidades de los materiales y procesos, tocando o traspasando los límites de las formas expresivas y funcionales de un objeto. La preocupación ambiental en procesos, materiales y formas de consumo se plantea como una variable más de diferenciación y como un aspecto clave en esquemas de desarrollo sustentable.

Los Diseñadores Industriales afrontamos (principalmente en los países en desarrollo) situaciones particulares debido a la realidad tecnológica y productiva de nuestro entorno; nuestra razón de ser y de pensar es *el producto* entendido como el resultado de propuestas de satisfactores de deseos como manifestaciones de necesidades de problemas particulares en entornos y grupos sociales definidos; nos concentramos en su configuración pero desconocemos en muchos sentidos la realidad de la empresa (y su entorno) que hace posible tecnológicamente nuestros diseños y del mercado en quien se sustenta su viabilidad comercial y los componentes, procesos y dinámicas de cada producto que finalmente definen el impacto ambiental de los objetos.

En ese actuar fragmentado de las diferentes áreas del conocimiento y la técnica, se ha manifestado una inhabilidad colectiva para ver las conexiones entre nuestros más complejos problemas (sociales, políticos, productivos, ambientales, etc.) con los más primarios y fundamentales procesos de la vida. Seguimos diseñando a partir de visiones locales e intereses particulares, sin ver más allá hacia el panorama real y sus afectaciones: se diseña para situaciones entendidas desde la lógica de la fragmentación del conocimiento que no contempla la complejidad de los problemas y sus campos de afectación o en sentido contrario, se atienden problemas que sobrepasan las fronteras de la disciplina; esas soluciones ‘específicas’ que damos a través del diseño, rápidamente hacen que estos se vuelvan obsoletos, peligrosos, insustentables e híper-artificiales debido a la falta de búsqueda de armonías y la no adecuación al mundo natural. Nos aproximamos a una sociedad que Lipovetsky llama la sociedad del Hiperconsumo, que por un lado “exalta los referentes de mayor bienestar, la armonía y el equilibrio y por el otro se presenta como un sistema hipertrofiado e incontrolado, un orden bulímico que lleva al extremo y al caos” (2006: 14-80).

Un producto-objeto es en muchos sentidos la razón de ser de una empresa, su quehacer diario, sus estrategias y la puesta en marcha de las mismas corresponden a esfuerzos para configurar las características que lo harán deseable para su usuario, la determinación y cumplimiento de requisitos y requerimientos del producto según un entorno determinado le permitirán suplir eficientemente las necesidades detectadas y lo harán competitivo frente a otros productos en el mercado, se requiere dar al producto mediante la intervención del diseño un valor agregado de modo que este satisfaga las expectativas de quien lo usa y mediante sus características tangibles e intangibles, sorprenda creando vínculos con el usuario más allá de su función primaria y mediante esto, asegurar (por lo menos temporalmente) la viabilidad de la empresa. La caracterización de un producto como “ambientalmente amigable” resulta ser una estrategia cada vez más válida en términos comerciales para dar valor a un producto y crear relaciones con los posibles consumidores, el mayor conocimiento por parte de los consumidores y mayores demandas de calidad... el deseo por aumentar la calidad de vida de todos debe ser entendida como un proyecto económico y productivo que base su estrategia en el desarrollo sostenible.

Todos los artefactos y construcciones que proyectamos los diseñadores son fácilmente relacionados con nuestro ambiente artificial, sin embargo, el reconocimiento de su influencia dentro del ambiente natural, se limita a reducir el impacto negativo sobre el mismo, pocas veces atienden a verdaderas relaciones dinámico-simbióticas encontradas en los sistemas naturales para la planeación y configuración de objetos artificiales.

“Los objetos de producción masiva (...) deben proporcionar una crítica rica sobre nuestra situación actual y entregar valores alternativos sociales, culturales, económicos, políticos, ambientales y tecnológicos para permitir la exploración de numerosas realidades alternativas a las propuestas frecuentemente desarrolladas por el diseño convencional” (Chapman, 2005:139).

Todos los productos pueden ser definidos desde aspectos técnicos, comerciales, funcionales, formal-estéticos, etc., por lo que resulta claro entender que en el proceso de configuración de un producto, cada disciplina relacionada con el diseño tenga su propia y particular visión de las características necesarias a ser incorporadas en ese producto; estas características, son muy variadas y van desde la factibilidad de producción, su margen de costos, el valor percibido, su grado de legibilidad, hasta aspectos culturales, formal-estéticos y de mercadeo. Muchas veces -y dada su diversidad- dos o más características esperadas en un producto se encuentran en contraposición o apuntan en sentidos contrarios, de modo que el cumplimiento de una parece ser solo factible por el incumplimiento de otra, y lo que resulta más complejo, muchas veces, un producto solo define para su creación como aspectos relevantes de su configuración, aquellos que marquen la disciplina que lo está desarrollando y corresponde al diseño incorporar y dar la mayor relevancia a los principios de sustentabilidad como fundamentales para la práctica del diseño.

El presente desarrollo investigativo, avanza en la línea de la elaboración de modelos de representación funcional de principios mecánicos que se encuentran presentes en las dotaciones biológicas de los animales, mediante la comprensión de las bases técnicas y funcionales de las soluciones desarrolladas por la naturaleza que han logrado un alto grado de eficiencia dado que la selección natural tiende a favorecer las mejores estructuras y comportamientos posibles; de esta manera, observando la naturaleza, se intenta dar vía a una visión sustentable de los productos desde su concepción. El propósito de este desarrollo, es realizar un avance significativo sobre un método gráfico de documentación y análisis de una estructura animal, usando herramientas digitales como el modelado paramétrico y el análisis mediante elementos finitos para el estudio de estructuras naturales complejas.

### **Elección del espécimen a investigar**

Se eligió esta especie de escarabajo, pues se ha establecido que la criatura más fuerte de la tierra es el escarabajo rinoceronte, debido a que puede cargar 850 veces su propio peso. Los cuernos en las cabezas de los Coleópteros pueden ser usados para excavar agujeros y crear su propio escondite, defender su alimento y a su pareja.

Los científicos afirman que el escarabajo se ha hecho tan fuerte no solo para buscar alimento en el escabroso amasijo del suelo selvático sino para lograr escarbar y ponerse a salvo utilizando sus cuernos, pudiendo cavar para escapar de una situación comprometida enterrándose en el subsuelo. La extrema fortaleza de su exoesqueleto y la fuerza de las palancas con él generadas, lo hacen valioso como fuente de inspiración para el diseño biomimético.

## Gráfica mediante elementos finitos

En el desarrollo de proyectos de ingeniería se debe realizar cálculos de elementos muy complejos y que por las características físicas o de las variables que intervienen se debían plantear por medio de ecuaciones diferenciales parciales las cuales por medio de aproximaciones se debían resolver, este primer método se conoció como diferencias finitas, el uso de este método se centra en que el dominio de la posible solución está dividida en un malla con puntos discretos o también conocidos como nodos. Este método es fácil de aplicar y de entender los inconvenientes que presenta es cuando las figuras tienen geometrías irregulares o condiciones de frontera no comunes.

El método de elementos es una técnica que se encarga de dividir el dominio de la solución en pequeñas zonas con formas mucho más simples, lo que permite que las geometrías irregulares, y condiciones de fronteras no comunes ya no sean un inconveniente para el cálculo de los sistemas que se estén analizando. El método de elementos finitos tiene una serie de pasos que son muy simples y que ya se encuentran sistematizados en los programas especializados encargados de realizar estos cálculos obteniéndose de esta forma la información necesaria dependiendo del caso de análisis que se esté realizando. Estos pasos son los siguientes.

**Discretización**, este primer paso consiste en realizar la división del dominio de la solución en los elementos finitos.

**Ecuaciones de los elementos**, se deben desarrollar ecuaciones para poder realizar la aproximación de cada uno de los elementos, se utilizan ecuaciones sencillas por su facilidad de manipulación matemática, por este motivo se usan polinomios, por lo regular de primer grado.

**Ensamble**, ya que se tiene las ecuaciones de los elementos individuales, las ecuaciones se deben ensamblar para que estén acorde a la caracterización de todo el sistema, se puede decir que este ensamble debe estar en consonancia con lo que se conoce como continuidad.

Este concepto de continuidad está relacionado a los valores de las incógnitas en sus nodos comunes sean equivalentes, de esta forma se garantiza que la solución total es continua.

**Condiciones de frontera**, estas son condiciones que se deben incorporar al momento de realizar el ensamble de las ecuaciones, debido a que estas condiciones definen características específicas del sistema que se está analizando.

**Solución**, depende del método numérico que para el caso que se está presentando utiliza el software al momento de realizar el análisis, debido a que estos métodos pueden cambiar en función de aumentar la eficiencia.

**Procesamiento final**, una vez se realiza el cálculo se obtienen los datos en una tabla y de manera gráfica los cuales indican los diferentes comportamientos que se presentan de acuerdo a las condiciones suministradas.

El análisis de estructuras mediante elementos finitos se usa cada vez con mayor frecuencia dados los desarrollos de programas y equipo de cómputo que acercan estos procesos a diseñadores e ingenieros. Sin embargo, el uso que se da por lo general a esta herramienta es en la mayoría de los casos para el análisis de estructuras y componentes artificiales como parte del proceso de diseño y verificación de las propiedades esperadas de productos industriales, estructuras, componentes de máquinas y en algunos casos aplicaciones médicas. La aplicación novedosa en este proyecto, es el análisis de este método numérico para la solución de un gran número de problemas de fenómenos físicos en estructuras naturales como lo es el exoesqueleto de un insecto, aprovechando la respuesta gráfica del análisis mediante elementos finitos para la representación de los fenómenos de la mecánica y permitir que personas con conocimiento superficial de la física, pueda interpretar fácilmente los resultados obtenidos.

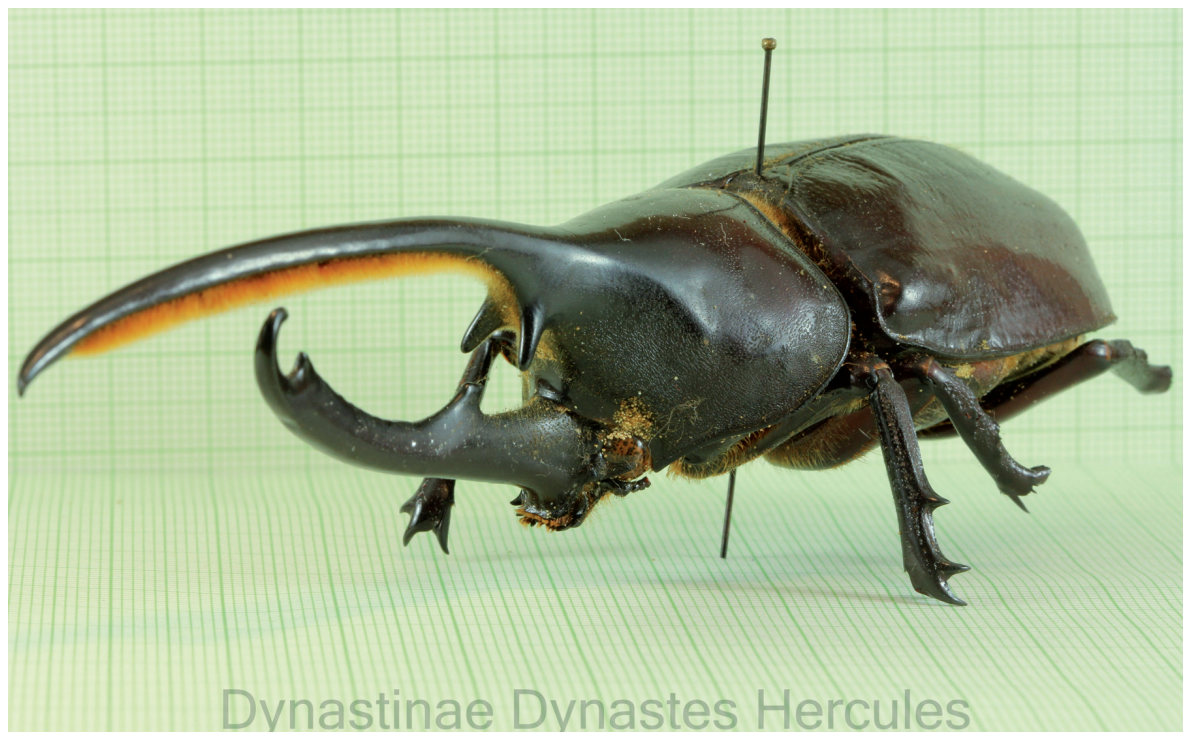
## Proceso de desarrollo de las imágenes

Para el presente proyecto se procedió de la siguiente manera.

1. Selección del espécimen a investigar. Observación de la muestra muerta en el Laboratorio de Biología de la Universidad del Valle.
2. Fotografía en alta definición de la muestra sobre papel milimetrado. Cámara CANON ESD 60D. Lente: Canon EF 100 mm f/2.8 Macro USM
3. Medición de partes y componentes sobre las fotografías.
4. Modelado de cada uno de los componentes de la estructura natural del exoesqueleto del espécimen. Modelado mediante el programa Solid Works Professional 2011 X 64 Edition.
5. Selección de un componente del exoesqueleto para hacer análisis gráfico.
6. Análisis gráfico. Mediante visualizaciones de SolidWorks: Modelado, superficies, curvatura y acabado. Mediante SimulationXpress: Factor de seguridad, deformación y esfuerzos.

Los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos, se presenta en formatos de imágenes con una gama de colores que a modo de codificación permiten visualizar la manera en que las condiciones físicas de la estructura están siendo afectadas al ser sometidas a las cargas especificadas. Mediante el uso de estas herramientas digitales se puede llegar a la conocer el comportamiento físico del elemento analizado sin tener la necesidad de conocer en profundidad la teoría que gobierna estos principios, que para este caso en particular son los relacionados con la mecánica de materiales en elementos biológicos con geometrías muy complejas.

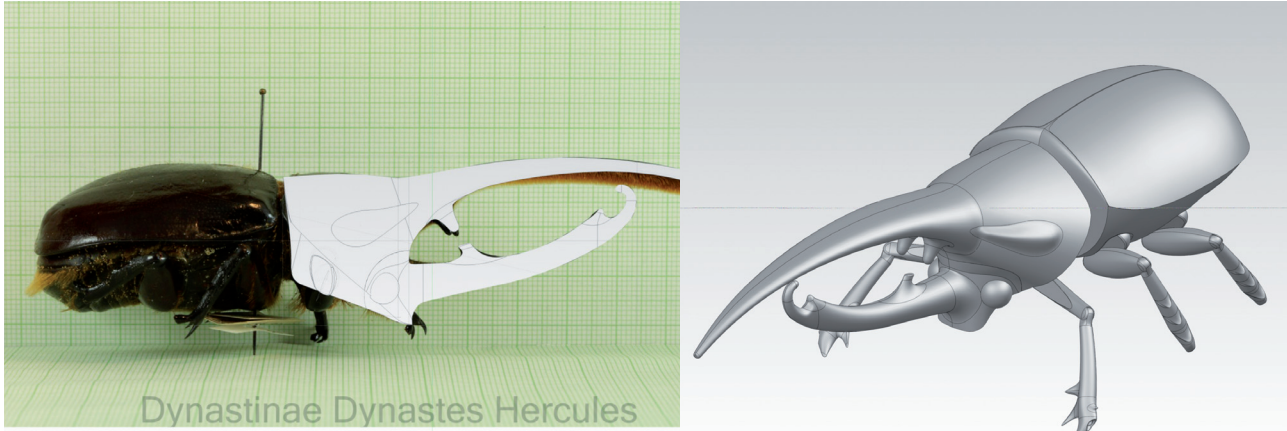
### Fotografía en alta definición del espécimen



**Imagen 1.** Fotografía en alta definición del espécimen.

La fotografía en alta definición del espécimen: Fam. Dynastinae. *Dynastes hercules*, fue realizada sobre papel milimetrado que sirve como referencia y facilita hacer mediciones sobre la fotografía. Se realizaron múltiples tomas, incluyendo vistas en planta, lateral derecha, lateral izquierda, inferior, frontal y posterior. Estas imágenes se usaron para observación de detalles no observables a simple vista y realización de mediciones de alta precisión.

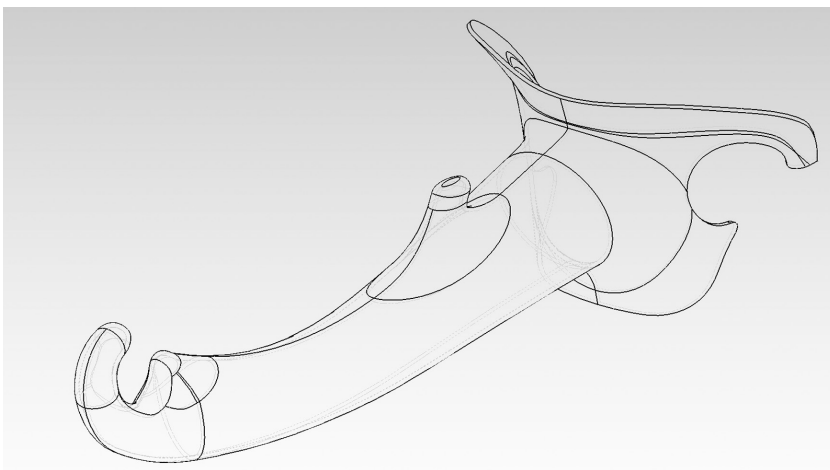
### Modelado general del insecto



**Imagen 2 y 3.** Modelado general del insecto: *Dynastes hercules*.

Mediante el uso del programa Solid Works, se digitalizó la totalidad del exoesqueleto para su posterior análisis. La imagen fotográfica se escaló y se usó como base para el modelado, ubicando una toma lateral, otra en planta y otra frontal en los planos correspondientes.

### Visualización mediante estructura de malla



**Imagen 4.** Modelado en visualización mediante estructura de malla.

La visualización mediante estructuras de malla, permite observar cada uno de los componentes geométricos estructurales del segmento del exoesqueleto a analizar, en esta imagen se puede visualizar la complejidad de la figura en cuanto a su geometría y los diferentes elementos que la componen lo cual permite un comportamiento mecánico diferentes al de una viga tradicional en voladizo.

Esta imagen en malla muestra de forma clara la continuidad del elemento modelado, lo que garantiza un cálculo de los elementos finitos sin ningún tipo de error, en otras palabras la aproximación que se obtiene por medio de la aplicación del método numérico de elementos finitos va a ser más aproximada a la realidad.

### Visualización mediante superficie

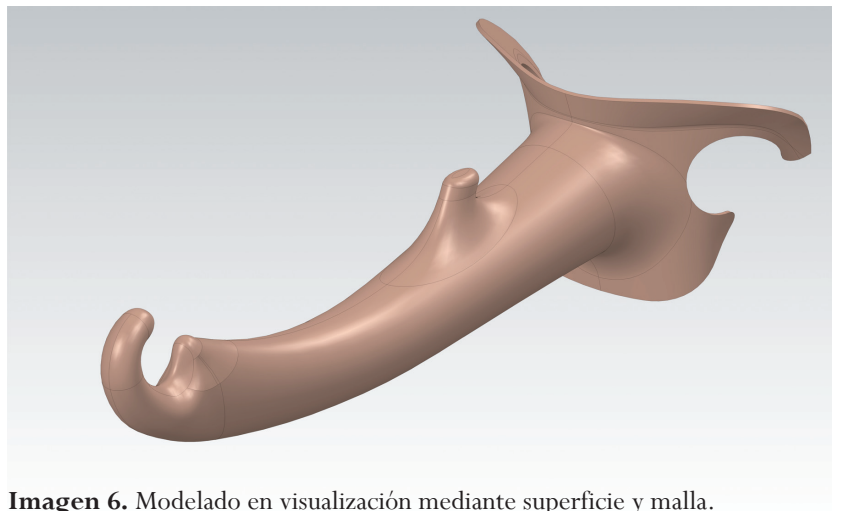


**Imagen 5.** Modelado en visualización mediante superficie.

La visualización del segmento de exoesqueleto como una superficie continua permite verificar la posibilidad de reproducir mediante un modelo virtual, la continuidad de una superficie compleja para su posterior análisis, de modo que esta superficie continua no presente desviaciones bruscas en el acabado superficial y se asemeje al elemento natural analizado.

### Visualización mediante superficie y malla

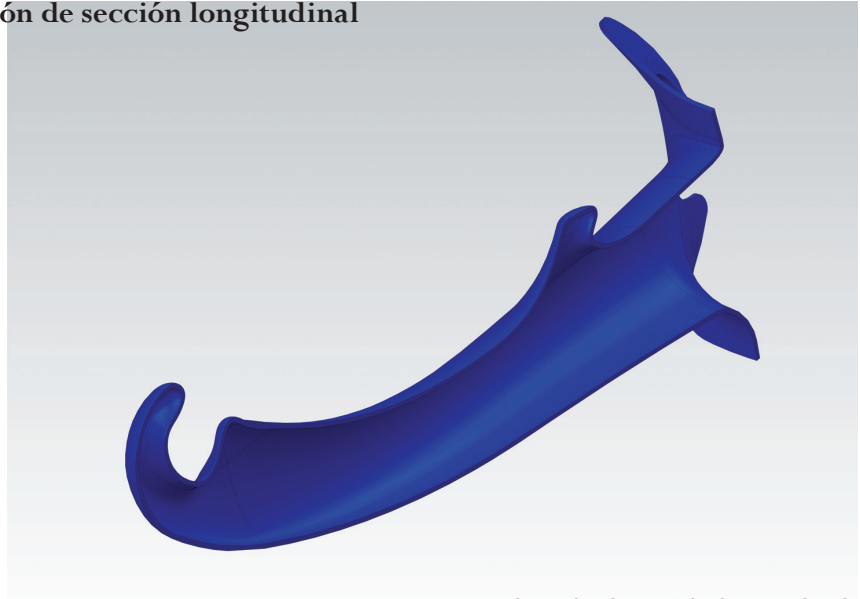
Verificación de las superficies que componen la estructura y verificación de su continuidad, de la continuidad de la superficie da garantía en que al momento de realizar el cálculo bajo la teoría de elementos finitos se puede llegar a una mejor aproximación. Permite observar en detalle las situaciones de cambio de superficie en los diferentes elementos geométricos constitutivos.



**Imagen 6.** Modelado en visualización mediante superficie y malla.



### Visualización de sección longitudinal



**Imagen 7.** Visualización de sección longitudinal.

Se observa la asignación de propiedades a la figura de modo que represente un exoesqueleto, o esqueleto externo continuo que recubre toda la superficie del espécimen estudiado, esta estructura cumple una función protectora, de respiración y otra mecánica, proporcionando el sostén necesario para la eficacia del aparato muscular y las palancas ejercidas con el cuerno.

Por la geometría compleja del cuerno y por la disposición no uniforme de material hace que el momento de inercia del cuerno sea aún más eficiente en términos de mejorar las condiciones de uso de material y los esfuerzos que ahí se presentan.

### Visualización mediante superficie altamente reflectora



La visualización mediante superficies altamente reflectoras permite la verificación visual de las cualidades formales de la pieza, incluso con mayor contraste que el que ofrecería un objeto físico real.

**Imagen 8.** Visualización mediante superficie altamente reflectora.

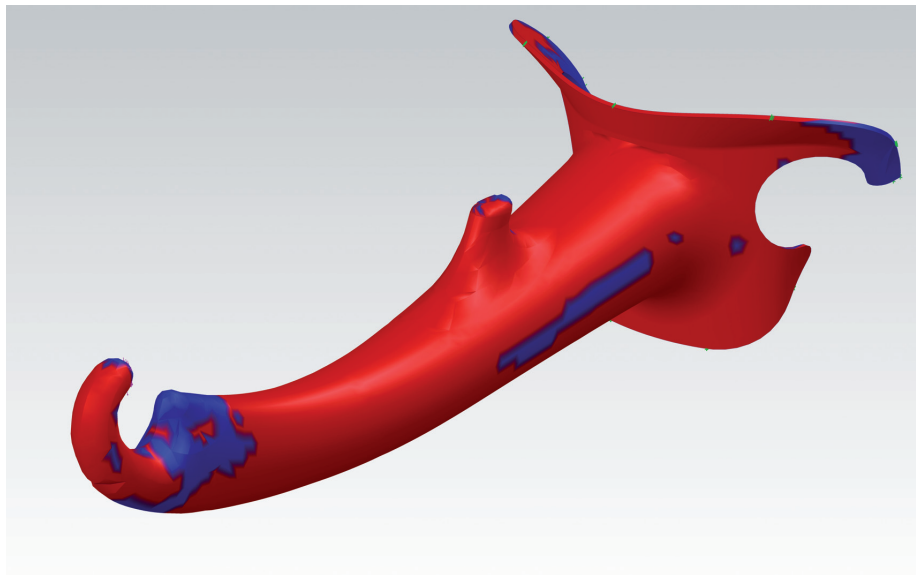
## Asignación de material



**Imagen 9.** Visualización mediante asignación de material con propiedades físicas similares a la muestra natural.

La asignación de un material a la pieza del exoesqueleto simula las cualidades físicas del objeto real, de modo que el comportamiento físico del modelo virtual se aproxime al objeto que representa. El exoesqueleto está compuesto por el polisacárido quitina, un polímero formado por cadenas rectas y simples (no ramificadas) de N-acetil-2-D-glucosamina, un monosacárido que incluye nitrógeno en su composición.

## Análisis de factores de seguridad

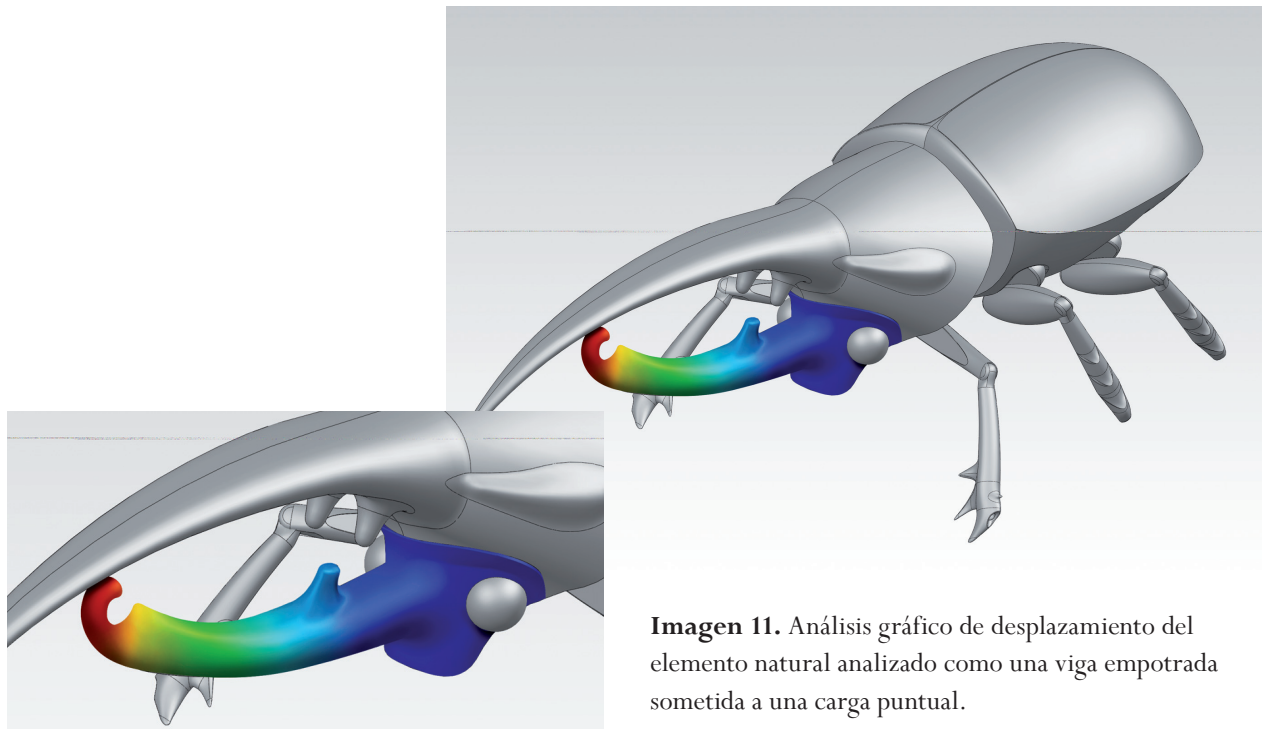


**Imagen 10.** Análisis gráfico de factores de seguridad del elemento natural analizado como una viga empotrada sometida a una carga puntual.

El análisis mediante elementos finitos utiliza para mostrar los resultados del fenómeno físico, una paleta de colores, con la cual indica en color rojo las zonas de mayor valor de esfuerzos, velocidad, deformaciones, factores de seguridad, presión, etc. y, con un color azul aquellas zonas con menores valores.

Aquí en la figura se pueden ver y confirmar lo que se había expuesto anteriormente con respecto a la eficiencia de cuerno, debido a que lo que nos indica el color rojo son los puntos donde los valores del factor de seguridad en diseño son los más aproximados a los de fluencia, lo cual nos indica que esta pieza es diseñada sin ninguna condición de sobredimensionamiento.

### Análisis de condiciones de desplazamiento bajo una carga puntual

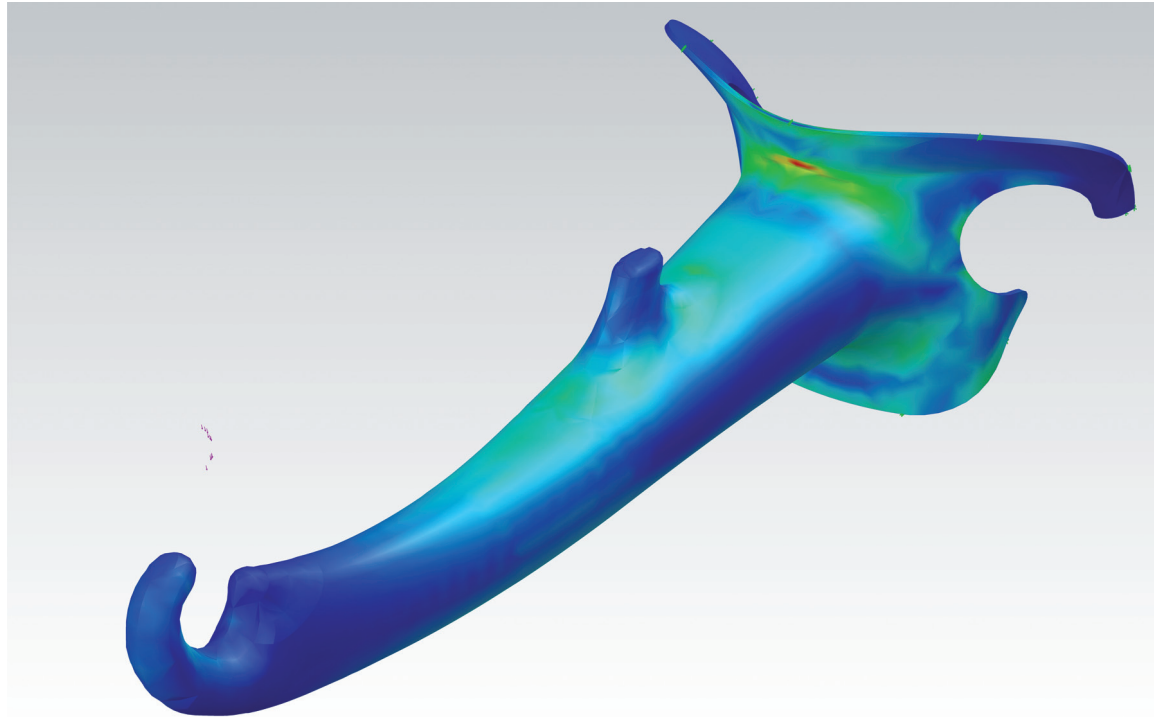


**Imagen 11.** Análisis gráfico de desplazamiento del elemento natural analizado como una viga empotrada sometida a una carga puntual.

Como es de esperarse, frente a una carga puntual ejercida en el extremo distal del apoyo del elemento actuando como una viga empotrada, el desplazamiento aumenta de manera directamente proporcional a la distancia del apoyo.

El comportamiento del cuerno es el esperado pero con resultados aún más sorprendentes, los cuales indican la mayor deformación en el extremo libre y sin ningún asomo de movimientos o desplazamiento en el lado empotrado, además por el tipo de empotre la zona que empieza a desplazarse se encuentra bastante alejada de la base, lo que garantiza la poca probabilidad de falla por este punto en condiciones extremas de aplicación de cargas repetidas, fluctuantes o alternas.

## Análisis de esfuerzo bajo una carga puntual

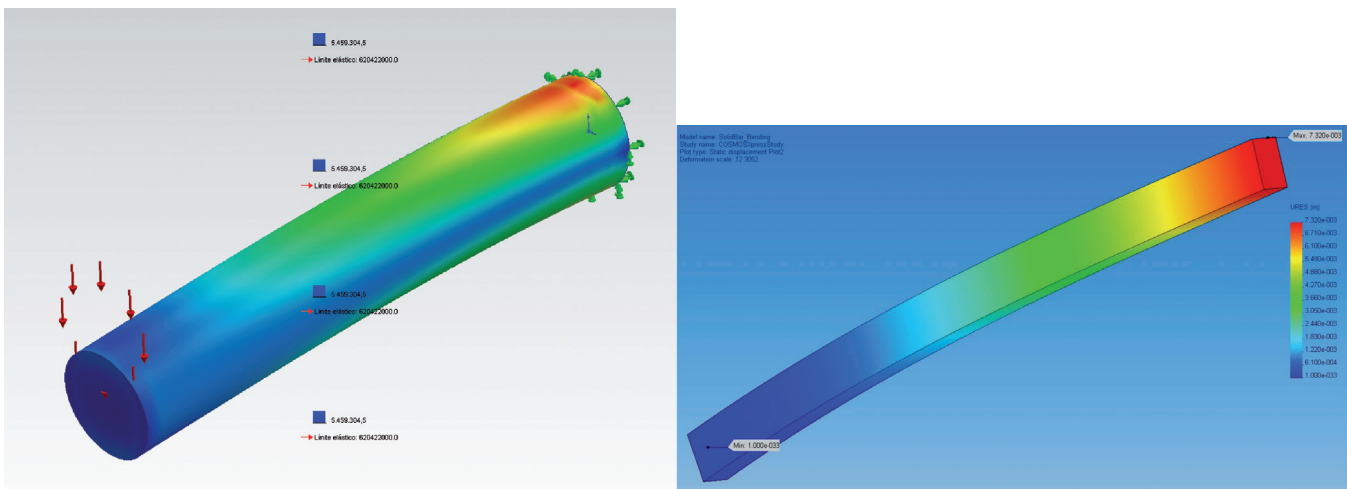


**Imagen 12.** Análisis gráfico de esfuerzos del elemento natural analizado como una viga empotrada sometida a una carga puntual.

Esta es -tal vez- la gráfica más compleja y rica para el análisis estructural, pues se evidencia gráficamente como la forma orgánica logra una distribución muy pareja de los esfuerzos, y presenta la protuberancia ubicada en el medio del cuerno como un disipador de esfuerzos. La distribución regular de la carga propia de esta estructura natural se hace evidente al realizar el mismo tipo de análisis a un elemento no orgánico (viga cilíndrica) empotrado, de dimensiones similares, iguales propiedades de material y carga (Ver figura 13).

Se podría atribuir el éxito de los resultados obtenidos en cuanto a los esfuerzos al excelente empotramiento, debido a que el empotramiento no tiene un cambio de sección brusco lo que hace que no se presenten concentradores de esfuerzo críticos que podrían generar fallas en la base del cuerno.

## Comparación de condiciones de esfuerzo en una estructura cilíndrica y la estructura natural



**Imagen 13.** Análisis gráfico de estrés de una viga cilíndrica empotrada sometida a una carga puntual comparada con la estructura natural.

Al comparar los resultados gráficos del análisis de esfuerzos de este elemento (no orgánico) resulta una concentración de esfuerzos, lo que equivale a una mayor probabilidad de falla. Resulta evidente en la gráfica la diferencia en la distribución de esfuerzos entre los dos tipos de estructuras.

### Conclusiones

Al momento de realizar el análisis de los datos arrojados por el software en cuanto al cálculo de elementos finitos se pudieron establecer diferentes características y ventajas de tipo estructural que hacen que el cuerno inferior del coleóptero tenga un muy buen comportamiento mecánico y eficiencia en aspectos tales como: el uso de material, las cargas aplicadas y la resistencia que soporta.

Se podrían enumerar varias características que hacen de este elemento un objeto muy eficiente en términos de su función.

La descripción general del cuerno en términos mecánicos es:

1. Se puede considerar como una viga empotrada en un extremo y libre en el otro (voladizo). Es muy importante tener en cuenta la situación que se presenta en el empotramiento del cuerno debido a que no es un empotramiento tradicional como los que se hacen en los montajes mecánicos, dado que en los empotramientos tradicionales se tienen situaciones de cambio de sección muy bruscas lo que hace que en estos puntos se presenten concentradores de esfuerzos muy altos ocasionando condiciones críticas para la falla del sistema-montado, pero en el caso analizado se puede notar que el empotramiento se hace de forma suave, el cambio de sección se presenta de manera secuencial y no abrupta, esto hace que en el punto de empotramiento deje de ser crítico debido a los altos valores de los concentradores de esfuerzos que ahí se podían presentar; además esto confirma la teoría de que los concentradores de esfuerzos cuando se calcula la constante conocida como factor geométrico que está determinada por la geometría del cambio de sección, en el caso de cambios de sección muy pronunciados es un valor que se vuelve infinito.

2. Viga hueca debido a que el coleóptero tiene un exoesqueleto, el momento de inercia de un cuerpo hueco es diferente al de un cuerpo macizo, lo que hace que tenga una mejor resistencia mecánica en cuanto a las condiciones de trabajo a que está sometido este cuerno, condiciones de flexión, esta condición lleva a que el elemento analizado esté bajo condiciones de esfuerzo de flexión el cual está determinado por el momento flector ( $M$ ), la distancia del eje neutro a la fibra más externa ( $c$ ) y el momento de inercia ( $I$ ) el cual se determina por la geometría de la sección transversal.

Las vigas en voladizo se comportan y se deben analizar bajo los principios de la ley de Hooke y con la deformación elástica, lo cual permite determinar la distribución de esfuerzos y con las condiciones de equilibrio se establecen las posibles relaciones existentes entre los esfuerzos y las cargas.

Para determinar el peor de los casos que se presentan en el análisis del cuerno se toma la fibra más externa del exoesqueleto debido a que en este punto se presenta el mayor valor de momento ya sea de tracción o compresión.

3. Viga con elementos de refuerzo, se pueden observar protuberancias en el cuerno del coleóptero, que a primera vista parecieran elementos ornamentales, pero al momento de realizar el análisis de elementos finitos de esta estructura del insecto se puede ver de forma clara que se utilizan como disipadores de esfuerzos al momento de que la carga es aplicada, estos elementos logran realizar esta tarea debido a que modifican aumentando el momento de inercia de la sección transversal lo que hace que el esfuerzo de flexión al cual está siendo sometido el cuerno se disminuya, estos elementos de refuerzo asumen parte del esfuerzo. El aumento del momento de inercia de la sección transversal es fácil de establecer al momento de observar la imagen 7 donde se presenta el corte transversal del cuerno.

## Notas

---

<sup>1</sup> Resultado del proyecto de investigación: Simulador biomimético de mecanismos de locomoción animal terrestre. Referencia para el desarrollo alternativo de medios de transporte humano. Proyecto aprobado en la Convocatoria de Creación Artística y Humanística 2010, de la Universidad del Valle.

<sup>2</sup> Diseñador industrial – Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga – Colombia). Especialista en marketing – Universidad del Valle (Cali – Colombia). Maestro en Diseño Industrial – Universidad Nacional Autónoma de México (México D.F. - México). Profesor asistente del Departamento de Diseño Facultad de Artes Integradas Universidad del Valle Cali – Colombia. Tels: (572) 3212375, 3212275. Correo: angel.uribe@correounivalle.edu.co.

## Referencias

---

Aposte, L., Berger G., Briggs, A. y Michaud G. (1979). *Interdisciplinarietà. Problemas de la enseñanza y de la investigación en las universidades*. México: ANUIES.

Chapman, Jonathan. (2005). *Emotionally Durable Design, Experiences and Empath*. London: Earthscan.

Findelli, Alan. (2001). Rethinking Design Education for the 21st Century: Theoretical, Methodological and ethical Discussion. *Design issues*, 17, (1). 5-17. Massachusetts Institute of Technology, USA.

Chapra, Steven. (2003). *Métodos numéricos para ingenieros* (cuarta edición). México: Mc Graw Hill.

Singer, Ferdinand. (1983). *Resistencia de Materiales* (tercera edición). México: Harla.

**Recibido:** Abril 23

**Aprobado:** junio 12 de 2012