

**EJE DE FORMACIÓN EN INVESTIGACIÓN**

**MONOGRAFÍA:**

**MEJORAMIENTO DE LA SUELA DE CALZADO PARA FÚTBOL A TRAVÉS DE  
LA BIOMIMÉTICA Y LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DIGITAL.**

**AUTORES:**

**SIMÓN OROZCO HENAO**

**SEBASTIAN RUEDA GUERRA**

**ASESOR:**

**DAVID TORREBLANCA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO**

**FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL**

**MEDELLÍN-ANTIOQUIA**

**2018**

## Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	2
Resumen.....	6
Introducción .....	7
1. Planteamiento del problema.....	8
1.1 Tema general del proyecto .....	8
1.2 Características generales del proyecto .....	8
1.3 Planteamiento del problema de la investigación, pregunta e hipótesis de investigación .....	9
1.3.1 Planteamiento del problema .....	9
1.3.2 Pregunta de investigación:.....	10
1.3.3 Hipótesis: .....	10
1.4 Elementos del problema de investigación.....	10
1.5 Alcances y limitaciones de la investigación alcances y riesgos:.....	11
2. Justificación.....	12
2.1 Validez y oportunidades del proyecto en el contexto de la investigación del diseño industrial. ....	12
2.2 Conceptualización y operacionalización de variables: .....	13
3. Marco de referencia .....	15
3.1 Antecedentes:.....	15
3.2 Marco teórico. ....	16
3.2.1 Calzado deportivo:.....	16
3.2.2 Biomimética en el diseño Industrial: .....	16
3.2.3 Fabricación digital:.....	17
3.3 Estado del arte .....	18
3.3.1 Diseño Industrial en el contexto del deporte .....	18
4. Objetivos.....	21
4.1 Objetivo general .....	21
4.2 Objetivos Específicos.....	21
5. Metodología .....	22

5.1 Técnicas utilizadas para la obtención y recolección de información .....	23
5.2 Objeto de estudio utilizado.....	24
5.4 Instrumentos y técnicas de análisis de información .....	24
5.5 Justificación de elección de métodos (instrumentos) para la recolección de información .	24
6. Resultados.....	26
6.1 Identificación del referente.....	26
6.2 Abstracción y modelación.....	27
6.2.1 Abstracción y modelación de características o principios naturales. ....	27
6.3 Obtención del modelo físico .....	30
6.3.1 Acercamiento a las tecnologías de fabricación digital .....	30
6.4 Análisis de movimientos y ángulos de flexibilidad .....	33
6.4.1 Análisis en Kinovea.....	33
CONCLUSIONES .....	39
REFERENCIAS.....	40
ANEXO 1.....	42

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Calzado deportivo Nike Vapor Híper Agility Cleats. ....	18
<b>Figura 2.</b> Nike Magista. ....	19
<b>Figura 3.</b> Traje speedo Fast Skin System.....	20
<b>Figura 4.</b> Movimiento biomecánico de las serpientes.....	26
<b>Figura 5.</b> Análisis del esqueleto de una serpiente, donde se conservan las uniones entre las partes del esqueleto. Fuente: autoría propia. ....	27
<b>Figura 6 .</b> Cótulo en la vista A y el Córdilo en la vista B .....	28
<b>Figura 7.</b> Ficha de abstracción 2, alternativa que cumplía los requerimientos, pero restringía movimientos. Fuente: Autoría propia .....	28
<b>Figura 8.</b> Ficha de abstracción 1, morfología abstraída con mecanismo de rótula integrado.....	29
<b>Figura 9.</b> Modelo digital final de abstracción del referente elegido. Fuente: Autoría propia.....	30
<b>Figura 10.</b> Primera prueba impresa; probeta de material TPU, material de impresión tipo elastómero. ....	31
<b>Figura 11.</b> Módulos juntos generando flexibilidad a partir de su mecanismo de rotación, material: ABS. Fuente: Autoría propia .....	32
<b>Figura 12.</b> Módulos impresos por rayos UV a pequeña escala, dimensiones: 2 cm X 2 cm. ....	32
<b>Figura 13.</b> Módulos ensamblados, ángulos de libertad material: ABS, para permitir que los movimientos sean más naturales, pero protegiendo el pie de movimientos antinaturales.....	33
<b>Figura 14.</b> Módulos ensamblados, ángulos de libertad que genera la modulación en una posición de flexión, material: ABS. ....	34

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Ángulos de libertad de los módulos enlazados en una trama, analizando dichos ángulos en los ejes transversales y longitudinales.....	35
<b>Tabla 2.</b> Comparación de los ángulos de libertad que se dan en el pie (movimiento natural), en la suela del calzado deportivo para fútbol y de los módulos enlazados en una trama, analizando dichos ángulos en el eje transversal. ....	37

## Resumen

En el presente proyecto de investigación se desarrolla una morfología, empleando la biomimética como herramienta de diseño, con el fin de proponer alternativas de solución a la poca flexibilidad de la suela del calzado deportivo de fútbol, que permita prevenir lesiones musculares y articulares a quienes practican este deporte. Para esto se realizaron observaciones en la naturaleza con la intención de encontrar un referente que cumpliera en tener en alguno de sus mecanismos el principio de flexibilidad, con el fin de abstraer el principio natural de movimiento que se aplicaría posteriormente a un modelo. La geometría abstraída fue digitalizada y modelada en softwares parametrizados 3D para luego fabricarlas usando impresión 3D para generar prototipos de ensayo con los que se analizaron las posiciones, movimientos y los ángulos de libertad que se generaron al ser ensambladas en una trama. Se encontró que, a través de las morfologías ensambladas se pueden mejorar los ángulos de flexión tanto longitudinales como transversales de la suela del calzado para fútbol, además de tener un control sobre ellos para que no se generen movimientos antinaturales al momento de los deportistas practicar el juego.

**Palabras clave:** *diseño industrial; biomimética; tecnologías de fabricación digital (TFD); calzado deportivo.*

## **Introducción**

En el contexto mundial del deporte, el desarrollo y diseño de calzado de alto rendimiento está en un momento de auge ya que se están combinando las formas de creación y fabricación con diferentes morfologías, materiales y tecnologías, mejorando el rendimiento de los deportistas y generando nuevas tendencias en los mercados. Sin embargo, su producción convencional arroja al mercado suelas que no generan la flexibilidad apropiada para realizar diferentes movimientos (correr, caminar, esprintar), por lo tanto, no ofrecen un buen desempeño al deportista (Henning, E.M 2011).

De acuerdo con lo anterior, se plantea una investigación en la cual se pudieran encontrar soluciones morfológicas, para mejorar el desempeño funcional de la zona metatarsal de la suela del calzado de fútbol a través de la integración de la biomimética y las tecnologías de fabricación digital; además, Esta investigación es relevante en el contexto de investigación ya que brinda la información necesaria para diseñar y desarrollar alternativas morfológicas específicamente para solucionar temas de flexibilidad en los puntos críticos de la suelas de calzado deportivo, por medio de las tecnologías de fabricación digital y utilizando este proceso como medio de producción.

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1 Tema general del proyecto**

Por medio de la biomimética y el diseño industrial se desarrolla una alternativa de solución para aumentar la flexibilidad de la suela del calzado deportivo con el fin de minimizar la generación de lesiones musculares y articulares en los jugadores. Las morfologías desarrolladas fueron analizadas y validadas mediante ensayos y pruebas de flexibilidad digitales y físicas.

### **1.2 Características generales del proyecto**

En este proyecto se realizaron observaciones y análisis a referentes naturales con el fin de realizar a partir de esto la abstracción y formalización para el planteamiento de una morfología que permita aportar al desarrollo de un componente para calzado que favorezca la reducción de la rigidez en dicho componente. Luego de esto, se realizó la modelación digital para posteriormente proceder con la fabricación del modelo en impresión 3D y validarlo mediante análisis de flexión y simulaciones digitales de su comportamiento bajo el software Kinovea.

La metodología de la investigación es tipo analítica-experimental ya que responde a planteamientos o preguntas a partir del ensayo y error, por medio de pruebas en tecnologías digitales como también pruebas físicas.



### **1.3 Planteamiento del problema de la investigación, pregunta e hipótesis de investigación**

#### **1.3.1 Planteamiento del problema**

En el contexto mundial del deporte, el desarrollo y diseño de calzado de alto rendimiento está en un momento de auge ya que está combinando formas de creación y fabricación con diferentes morfologías, materiales y tecnologías, mejorando el rendimiento de los deportistas y generando nuevas tendencias en los mercados. A pesar de esto, se ha observado que en algunos casos el calzado deportivo no se adapta de manera satisfactoria a los diferentes movimientos, esfuerzos y condiciones a las cuales es sometido. En casos particulares como el fútbol, la distancia cubierta durante un partido por un deportista es en promedio entre 8.6 – 14 km (Reilly & Thomas 1976, Bangsbo 1994), dentro de la cual hay además una alta demanda de movimientos y esfuerzos asociados al desplazamiento del jugador en el terreno, que sumados al hecho anteriormente mencionado le exigen al deportista una gran destreza. Se ha encontrado que en dichas actividades los deportistas al usar las zapatillas convencionales sufren de múltiples lesiones en las articulaciones y los músculos de sus piernas, debido a que la suela no les proporciona la versatilidad necesaria para realizar posiciones variables que generan alta presión sobre puntos críticos la suela del calzado deportivo y del pie, además de, movimientos de flexión, torsión los cuales son muy exigentes a la hora de desempeñar la actividad física, demandando así el uso de un calzado deportivo con mejores prestaciones con el fin de evitar las lesiones anteriormente mencionadas. Los problemas de lesiones musculares y articulares son causados por la flexibilidad y versatilidad en el calzado de futbol. Con base a lo anterior se ha identificado que el calzado comercial con aplicación tecnológica media-baja, es decir que no es la última tecnología, no es lo suficientemente adecuado para los deportistas en el desarrollo de esta actividad, ya que no propician flexibilidad y agilidad a la hora de

realizar ciertos movimientos en el campo de juego. Cabe destacar que no hay estudios que aborden de manera sistemática el problema abordado en el presente trabajo de investigación, debido a que este tema está a la vanguardia y se abordan los diferentes elementos del problema de manera individual.

En el presente trabajo se plantea desarrollar mediante la combinación de la biomimética, las tecnologías de fabricación digital y el diseño industrial una superficie compuesta por módulos que por medio de principios naturales pueda solucionar la problemática identificada en la suela del calzado para fútbol, utilizando las tecnologías de fabricación digital como medio de producción, específicamente la impresión 3D por FDM (*Fused Deposition Modeling*) y por rayos UV, mejorando así, la suela del calzado para futbol al mismo tiempo que se generan nuevas oportunidades para el diseño.

### **1.3.2 Pregunta de investigación:**

¿Cómo mejorar el diseño de las zonas con mayor esfuerzo de la suela del calzado deportivo de fútbol, a través de la aplicación de la biomimética y las tecnologías de fabricación digital?

### **1.3.3 Hipótesis:**

La abstracción de patrones morfológicos, a partir de los principios naturales que generen movimientos de flexión, permiten mejorar la flexibilidad de las suelas de calzado deportivo.

## **1.4 Elementos del problema de investigación**

Los elementos más importantes que componen el problema planteado son: La poca flexibilidad de la suela del calzado deportivo que hay en las prácticas del fútbol, es decir, la flexibilidad para la adaptación a la superficie; las lesiones musculares y articulares

como calambres, contracturas, roturas y también lesiones articulares como distensiones articulares, esguinces y luxaciones causadas por la rigidez del calzado y sus materiales no flexibles; la abstracción biomimética de referentes de la naturaleza que presenten un buen desempeño al momento de realizar diferentes movimientos y como, se puede intervenir la suela del calzado de fútbol a través de una textura, que genere un modularidad eficiente.

### **1.5 Alcances y limitaciones de la investigación alcances y riesgos:**

Con la investigación se realiza la identificación de principios y morfologías naturales para materializarlos en soluciones del problema a través de la fabricación digital. Para esta investigación se realizaron análisis tanto cuantitativos como cualitativos. El desarrollo y fabricación de estas morfologías fue en forma de módulos que se imprimieron en fabricación aditiva y estereolitografía que se utilizaron para validar el principio de rotación abstraído, no se desarrolló ni se fabricó en la investigación algún tipo de suela para calzado deportivo, solo se realizaron abstracciones morfologías de patrones modulares en softwares 3D para su posterior fabricación con la intención de tener aplicación en la suela para calzado deportivo.

## **2. Justificación**

### **2.1 Validez y oportunidades del proyecto en el contexto de la investigación del diseño industrial.**

En el contexto mundial del deporte, el desarrollo y diseño de calzado de alto rendimiento está en un momento de auge ya que está combinando formas de creación y fabricación con diferentes morfologías, materiales y tecnologías, mejorando el rendimiento de los deportistas y generando nuevas tendencias en los mercados.

Por medio de la combinación de la biomimética y los procesos del diseño industrial y la tecnología de fabricación digital se pueden plantear infinidad de morfologías particularmente en la aplicación de principios y características naturales en el diseño de productos, que sean coherentes con las necesidades que exigen los usuarios de un mercado en específico que permiten su posterior producción en las tecnologías de fabricación digital que tiene como ventaja además de la obtención de resultados previos digitales, optimiza el tiempo de prototipado de las propuestas, y su posterior fabricación para llegar a un resultado final óptimo y así aportar soluciones morfológicas que puedan ser aplicadas al desarrollo no solo de las suelas para calzado deportivo que en este caso aportará a beneficiar la salud del deportista previniendo de lesiones musculares y articulares, que además es coherente con el contexto mundial en el que se encuentra las TFD que están siendo utilizadas para fabricar gracias a la característica de la fabricación de formas complejas que puede ser impresa mediante éste proceso de producción.

Además, la aplicación de la morfología resultante, el diseñador al comprender el comportamiento mecánico de los módulos ensamblados, podría determinar el material

adecuado para su fabricación y la mejor forma de aplicarlos en los productos que esté desarrollando, es decir, podría ser utilizada en otros ámbitos del diseño, incluyendo la arquitectura, en los cuales se puede variar de tamaño de la morfología para cumplir funciones específicas, según las necesidades, como por ejemplo a la producción de prendas inteligentes para la realización de un deporte, en los cuales a través de circuitos que van enlazados en la trama que se genera, para tener control de las diferentes variables que tienen cada deportista al realizar la actividad y a partir de ello tomar medidas para la optimización del desempeño del jugador o también, en el caso de la arquitectura, adecuando el tamaño para las construcciones, podría flexibilizar estructuras, lo que permitiría pasar de formas monolíticas, lograr la construcción de estructuras con diferentes geometrías con materiales convencionales de construcción, además de generar cambios de ángulos en puntos críticos de la estructura que permitirían optimizar la resistencia de estos puntos y por ende obtener estructuras más seguras.

## **2.2 Conceptualización y operacionalización de variables:**

- Se identificó en el trabajo de campo que el 100% de los jugadores entrevistados respondieron que sí han tenido algún tipo de lesión o trauma muscular o articular a causa de problemas funcionales asociados al calzado de fútbol o específicamente a la suela de este calzado mismo.

- Las zonas más críticas de la suela del calzado de fútbol son la zona de los metatarsos y el talón del pie, ya que son los puntos de mayor esfuerzo e interacción del jugador y el terreno de juego.

- Se evidenció que los jugadores se sentían limitados en sus movimientos y prácticas por la suela del calzado de fútbol, ya que en dicho calzado aparte de ser poco flexible los taches no tienen un equilibrio entre taches cortos y altos para poder jugar en cancha de sintética o grama.

- La flexibilidad tanto de la pieza intervenida, como la relación de la suela al terreno de juego es una variable que permite determinar puntos críticos los cuales serán intervenidos por medio de herramientas de análisis de información y actividades experimentales.

- Se identificó que hay una tendencia en optimizar la suela del fútbol o el calzado en general ya que se evidenciaron problemáticas que pueden tener posibles soluciones por medio de la biomimética y las tecnologías de fabricación digital.

### **3. Marco de referencia**

#### **3.1 Antecedentes:**

##### **3.1.1 Mecanismo Windlass**

Según John Hicks en su libro “The mechanics of the foot, II: the plantar aponeurosis and the arch” el mecanismo Windlass es el sistema formado por la fascia plantar, que se une anteriormente con el primer metatarsiano a través de dos pequeños huesos llamados sesamoideos, que se encuentran en la parte inferior del ante pie, cerca del dedo gordo del pie, uno en la parte externa y el otro cerca del centro. Estos huesos entre otras funciones actúan como poleas. Todo este sistema es un modelo mecánico que brinda información detallada de los movimientos del pie y sus tensiones. (Hicks, 1954). Este mecanismo muestra y explica la manera de cómo se comporta la fascia plantar, que es un tejido que llega del talón a los dedos del pie, durante las actividades que soportan peso y proporciona información con respecto a las tensiones biomecánicas producidas. Se distinguen tres tipos de movimientos, el primero Windlass activo que describe el efecto de la dorsiflexión de las falanges del pie, Windlass inverso que se produce una plantar flexión metatarsofalángica que aplana el arco al alejar el metatarsiano y el calcáneo, los cuales toman una posición más horizontal y el tercero que es Windlass pasivo que describe el efecto que tiene la plantar flexión del tobillo al inicio de la fase propulsiva. Esta información fue clave para la investigación porque permitió comprender de manera asertiva cual es la biomecánica, sus ángulos de movimiento, límites y alcances, posiciones e importancia para el cuerpo.

## **3.2 Marco teórico.**

### **3.2.1 Calzado deportivo:**

Para el Doctor Javier Abian Vicen (et. Al, 2012) en su libro “ La biomecánica y la tecnología aplicados al calzado deportivo” Cuando se va a practicar un deporte, en este caso el fútbol, la intensidad de los desplazamientos y la versatilidad de los mismos, provoca que las cargas mecánicas soportadas por el pie son muy altas; El calzado deportivo se encarga de proteger a los pies de los diferentes impactos que puede tener (contra el suelo, choques entre jugadores) y de transmitir al cuerpo dichas fuerzas ejercidas sobre el mismo, además, para protegerlo de posibles lesiones al momento de realizar la práctica deportiva, que a su vez, busca aportar la máxima comodidad y efectividad. Por esto es esencial que se adapte a las características individuales de cada deportista y a las condiciones específicas del fútbol.

Los movimientos que realiza el pie durante la práctica de fútbol lleva a determinadas articulaciones a sus grados máximos de movilidad que el calzado debe de además de respetar estos límites, debe facilitar los movimientos y su versatilidad; asimismo, también existen movimientos no naturales que se pueden producir durante la práctica deportiva y que el calzado, a su vez debe ayudar a limitar (Vicén, J., Garrigós, J. D. C., González, C., & Salinero, J. J. 2012).

### **3.2.2 Biomimética en el diseño Industrial:**

Según Ever Patiño, Miguel Arango Marín y Juan David Jaramillo en su artículo “Biomimética o la traducción de los fenómenos biológicos al diseño” Los procesos biológicos presentan características que los hacen idóneos para la utilización en el diseño, entre ellas la capacidad de los sistemas vivos en conformarse en una red adaptativa y de igual forma, la posibilidad de evolucionar mientras se mantienen vivos. Científicos como Maturana y Varela



(1992, pg.36) han demostrado la similitud que tiene el proceso cognitivo, con el proceso biológico de determinados seres vivos.

Los recursos formales son una serie de patrones geométricos que utiliza la naturaleza para responder óptimamente a determinada solicitud, surgen porque físicamente la materia debe reducir la energía necesaria para construir y para ello emplea eficientemente lo poco con lo que puede trabajar, crecen entonces, en la naturaleza una variedad de patrones, con el fin de optimizar al máximo los recursos.

La búsqueda de alternativas funcionales de producto, tienen un carácter exploratorio, investigar las funciones resueltas por la naturaleza, permiten comprender, como se solucionan dichas solicitudes, para aplicarlas al diseño. La innovación del producto implica la integración y uso de nuevos métodos de diseño, según modelos basados en analogías de estructura-función- comportamiento, donde la definición de las características estéticas y técnicas es determinante (Mazo, E. P., Marín, M. A., & Flórez, J. D. J. 2016).

### **3.2.3 Fabricación digital:**

Para Rodrigo Alvarado en su Tesis “Fabricación digital de modelos constructivos: análisis de equipos y procesos” La fabricación digital puede ser definida como un “proceso computacional que transforma elementos materiales”, lo que en general se pueden realizar a través de dos sistemas: sustractivos o aditivos. Los sistemas sustractivos extraen el material y se asocian a máquinas de control numérico (CNC). Los sistemas aditivos, solidifican el material y se vinculan a las máquinas de prototipado rápido (PR), sin embargo, hoy en día la impresión 3D está en un momento de auge porque muchas empresas han adquirido este

servicio y han comprobado que ha sido de excelente ayuda además que también las empresas experimentan con nuevos métodos y tecnologías (Alvarado, R. G. (2012).

### **3.3 Estado del arte**

#### **3.3.1 Diseño Industrial en el contexto del deporte**

##### ***3.3.1.1 Nike Vapor Hyper Agility Cleats***

Estas zapatillas fueron construidas con el fin de ofrecer las máximas prestaciones en momentos de la actividad física como el frenado, la aceleración, la agilidad y el agarre, todo gracias a un diseño ingenioso en conjunto con la suela y los tacos, construidos por medio de la impresión 3D. (*Rare Delights*, 2017); (Nike, 2014).



**Figura 1.** Calzado deportivo Nike Vapor Híper Agility Cleats.

Fuente: Nike Football Accelerates Innovation with 3D printed “Concept Cleat” for Shuttle. Recuperado de: <https://news.nike.com/news/nike-football-accelerates-innovation-with-3d-printed-concept-cleat-for-shuttle>

##### ***3.3.1.2 Nike Magista:***

Las zapatillas para fútbol “Nike Magista, Obra II” revolucionaron el mercado de zapatillas deportivas en el 2014 cuando Nike rompió récord en ventas este año cuando lanzó al mercado el proyecto Nike Magista el cual tardó 4 años de desarrollo, indagando la suficiente información con diferentes deportistas profesionales de las mejores ligas del mundo, creando

así estas zapatillas que tienen como factor diferenciador que cubre una gran parte del tobillo y la parte baja de la pierna proporcionando más fluidez y naturalidad en el vínculo físico de la zapatilla con el jugador. (Alonso, 2014)



**Figura 2.** Nike Magista.

Fuente: Calzado deportivo que se desarrolló con el objetivo de optimizar la superficie del calzado y protegiendo la zona de los tobillos. Recuperado de: <https://www.futbolemotion.com/comunidad-futbol/es/blogs/directo-del-horno/nike-magista-obra-ii>

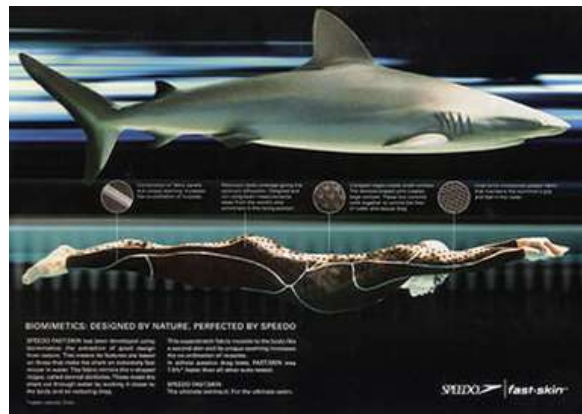
### ***3.3.1.3 Speedo Fast skin Racing System***

Speedo, marca deportiva de natación, en colaboración con la NASA, la universidad de Otago en Nueva Zelanda, el instituto australiano de deporte, además de Aqualab que es el centro de investigación de Speedo en Nottingham, Gran Bretaña, desarrollaron un traje con las cualidades más óptimas para que los nadadores pudieran fluir de una manera eficaz, en este caso en el agua (Britez, J. 2013).

*Fastskin Racing System 'Fit Point Markers'* (Speedo, 2016) es un nuevo sistema de marcado anatómico creado para garantizar que el bañador se alinee exactamente en las partes específicas del cuerpo que faciliten su forma "tubular" y reduzcan aún más la resistencia.

La gorra y gafas cuentan con la innovadora tecnología Fit IQ de Speedo, diseñada utilizando la misma tecnología de escaneo 3D que alinea a los contornos de la cabeza y la cara. El centro de investigación y desarrollo “global Speedo Aqualab” que identificó que la forma óptima del cuerpo para avanzar en el agua es tubular. Como resultado, el traje Speedo *Fastskin 3* de Súper Élite, uno de los productos desarrollados como parte del Sistema *Fastskin Racing*, está diseñado para esculpir el cuerpo de forma "tubular". Esto se ha logrado gracias a un nuevo sistema de tejido llamado ‘*3D Zoned Compression*’ que tiene niveles variables de compresión a lo largo del bañador, en función de su eficacia de cada zona del cuerpo.

(Speedo, 2016)



**Figura 3.** Traje speedo Fast Skin System

Fuente: Speedo Fast skin system; creación de una “piel” artificial tubular, con módulos tridimensionales no bidimensionales, que permiten un mejor ajuste con el cuerpo del deportista. Recuperado de:<http://www.speedo.es/tecnologia/fastskin>

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Mejorar el desempeño funcional de la zona metatarsal de la suela del calzado de fútbol a través de la integración de la biomimética y las tecnologías de fabricación digital.

### **4.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar qué principios o características de la naturaleza permiten disminuir la rigidez de la suela del calzado deportivo en la región metatarsal.
2. Seleccionar al menos un principio de la naturaleza para la materialización de las propuestas
3. Elaborar modelos digitales de la suela del calzado deportivo en la región metatarsal con base al referente seleccionado.
4. Obtener una muestra física representativa del estudio seleccionado, empleando la fabricación digital como proceso de manufactura.

## 5. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados se realizó inicialmente la identificación de referentes morfológicos de la naturaleza con potencial de aplicación de acuerdo a la necesidad requerida que es un movimiento de rotación controlado, para lo cual se realizó una visita a la colección de reptiles del Museo de ciencias naturales La Salle ubicado en el Instituto Tecnológico Metropolitano de la ciudad de Medellín en la que se utilizó el estereoscopio (EUROLAB Mod. NSZ 405d) para observar los referentes y su funcionamiento de una forma más detallada. Con esta información se identificaron características con las que se evaluó la viabilidad de trabajar con los referentes elegidos con base a las herramientas que se tenían a disposición. Se concentró la investigación en buscar un referente que cumpliera con una morfología que aportará la propiedad de ser flexible en respuesta a una serie de movimientos y con la que se pudiera realizar una abstracción morfológica, por consiguiente, el referente elegido son las vértebras de la serpiente con las cuales se interactuó en el museo manipulándolas de forma manual, observando y recopilando datos de medidas, ángulos, limitaciones y alcances sobre su rotación en los distintos ejes, obteniendo así una ficha técnica de las diferentes características, funciones y formas del referente con la intención de abstraer formalmente el principio de rotación que se necesita para desarrollar una morfología adecuada que se pueda aplicar al calzado deportivo para fútbol.

Con base a las características del referente se realizaron unas fichas de abstracción con las cuales se inició el proceso de modelación 3D en el que se desarrolló una morfología que cumpliera con las características funcionales del referente, fuera viable para producir por medio de las tecnologías de fabricación digital y también aplicable a la suela del calzado deportivo. Luego de esto se realizaron las simulaciones en el programa Kinovea, con el que

se buscó obtener información acerca de la flexión, los ángulos de libertad y el comportamiento biomecánico que tiene la morfología abstraída. Con base a esto se procedió a fabricar la morfología por medio de la impresión 3D de rayos UV en la impresora *Asiga Pro 75* la cual ofrece alta calidad de impresión a una resolución a muy pequeña escala lo que resultó muy coherente para la morfología abstraída ya que por su tamaño se requirió de una TFD con mayores prestaciones y que brindará mejores resultados. Las especificaciones de la impresora 3D son las siguientes: tamaño de construcción: 96 x 54 x 200mm, resolución de 75 micras, UV LED y su tamaño es de 450 x 490 x 800 mm.

### **5.1 Técnicas utilizadas para la obtención y recolección de información**

En la fase de exploración del referente se utilizaron las siguientes herramientas para la recolección de información como lo fueron las bitácoras de campo realizadas en el Museo de Ciencias Naturales De la Salle en las que se escribió información relevante tal como características morfológicas y funcionales para escoger el referente con el que se trabajó, en dichas bitácoras se registraron observaciones a los ejemplares de las colecciones por medio de microscopios y estereoscopios con los se identificaban composiciones formales y funcionamiento a pequeña escala registrando así los datos recolectados para su posterior evaluación de acuerdo a los requerimientos de la investigación. Otros aspectos que se registraron en las bitácoras de campo fueron los protocolos de investigaciones previas de científicos que ya hubiesen trabajado con estas especies para ver así cuál era el paso a paso que seguían los investigadores al trabajar con un ejemplar disecado, huesos o diferentes muestras de las especies exhibidas en las colecciones, con esta información se desarrollaron los protocolos de observación del referente elegido que era un esqueleto de serpiente, específicamente la unión entre las vértebras, se observaron y registraron todos los

movimientos de rotación y ángulos posibles que brindaba el referente incluyendo también los límites de este movimiento.

## **5.2 Objeto de estudio utilizado**

Los objetos de estudio utilizados como referente fueron en un primer caso la familia de los gecónidos, por su adherencia a la superficie, sin embargo, se enfocó la investigación a resolver problemas de flexibilidad solamente por lo que se decidió trabajar con las vértebras de la columna de una serpiente.

## **5.4 Instrumentos y técnicas de análisis de información**

- Instrumentos de observación (estereoscopio EUROLAB Mod. NSZ 405d)
- Programas de modelado Digital (Rhinoceros 5.0)
- Programas para la fabricación 3D de archivos STL
- Programa para el análisis biomecánico (Kinovea)

## **5.5 Justificación de elección de métodos (instrumentos) para la recolección de información**

Los métodos realizados a lo largo de la investigación, han tenido diferentes etapas para la recolección de la información, las fuentes secundarias nos permitieron tener un espectro muy amplio de lo que se podía encontrar en los diferentes factores que están relacionados a la investigación (diseño industrial, biomimética, tecnologías de fabricación digital, fútbol), que posteriormente, se genera un filtro de la información recolectada y se decide cuáles son los pilares por su pertinencia con el proyecto. En cuanto a las salidas de campo, nos permitió verificar de primera mano la información secundaria, que se había encontrado y elegido para proceder en la investigación, este fue un paso muy importante para el proceso debido a que se

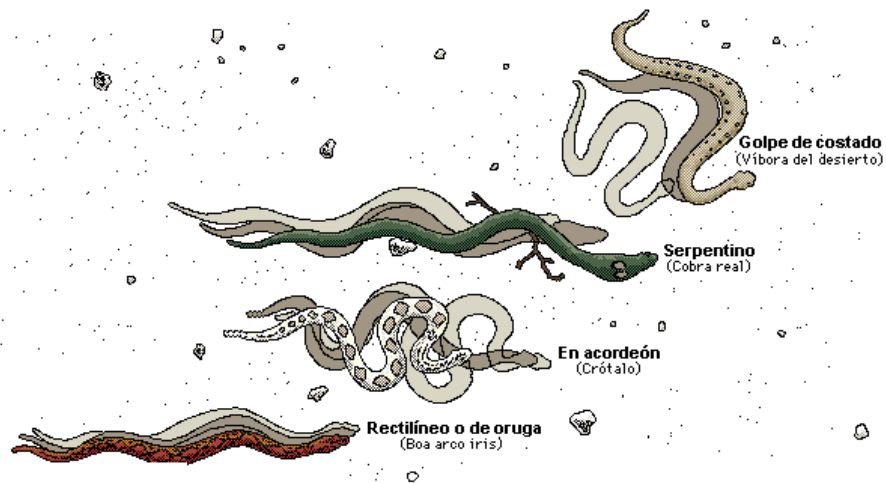


pudo, además de verificar la veracidad de la información, acercarnos más a la realidad de los diferentes contextos en los cuales está envuelta la investigación, y también se pudo verificar dicha información con la opinión de diferentes expertos en los temas elegidos en la investigación, teniendo así, más seguridad sobre los procesos que se van a realizar de este punto en adelante. El programa elegido para la realización de la modelación digital (Rhino) que permitió experimentar con diferentes formas morfológicas, que brindaran las características importantes que se observaron el referente, para la solución al problema identificado; una de las ventajas del uso de esta herramienta es que cuando se modela, permite, el cambio de diferentes parámetros durante el proceso, y ya que como es una interfaz de manera virtual, no es necesario la fabricación inmediata en materiales reales, para detectar inconsistencias, si no que en la misma interfaz se pueden detectar y solucionar, antes de la producción.

## 6. Resultados

### 6.1 Identificación del referente

Por medio de la herramienta de bitácoras de registro de actividades del museo De la Salle del ITM, en las que se recolectaron datos bibliográficos e información acerca del funcionamiento de las vértebras de la serpiente, se identificó que el movimiento que generan es coherente con los requerimientos de flexibilidad de la investigación. Los movimientos son golpe de costado, serpentino, en acordeón y rectilíneo, estos permiten que la serpiente tenga movimientos ondulares laterales y verticales como se puede observar en la figura 4. Por otra parte, la manipulación de todo el esqueleto de la serpiente permitió reconocer los límites que tiene la vértebra en cuanto a los movimientos ondulares sin embargo esto lo hace más eficiente en términos de flexibilidad ya que mantiene los movimientos controlados.



**Figura 4.** Movimiento biomecánico de las serpientes

Fuente: Movimientos de desplazamiento de la serpiente, Golpe de costado, Serpentino, En acordeón y Rectilíneo.  
Recuperado de: <http://almez.pntic.mec.es/~jrem0000/dpbg/2eso/serpientes/locomocion.htm>



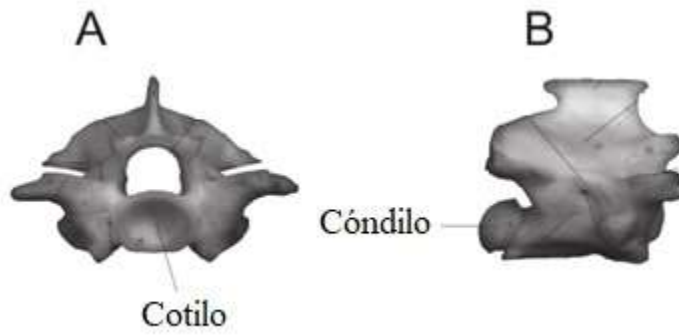
**Figura 5.** Análisis del esqueleto de una serpiente, donde se conservan las uniones entre las partes del esqueleto.  
Fuente: autoría propia.

## **6.2 Abstracción y modelación**

### **6.2.1 Abstracción y modelación de características o principios naturales.**

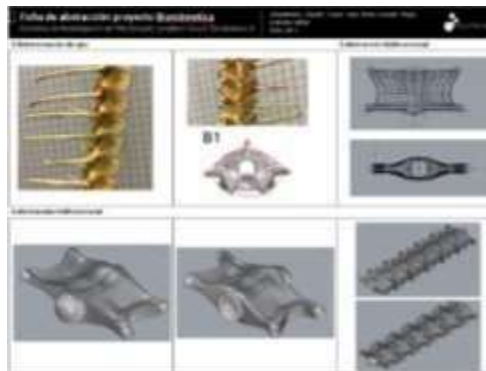
Para la realización de la abstracción de las características flexibles de las vértebras de la serpiente se desarrollaron fichas de abstracción con las cuales se identificaron las partes de la vértebra de la serpiente que actúan como rótula y generan el movimiento ondulatorio que permite su desplazamiento, como se puede observar en la figura 5, las partes de la vértebra identificadas son el cóndilo y el cotilo que actúan como un mecanismo de rótula macho - hembra, con esta información se desarrollaron abstracciones morfológicas que fueran adecuadas y coherentes para el buen funcionamiento del mecanismo de rótula identificado, brindando la flexibilidad requerida para el desarrollo del proyecto. Como se puede observar en la figura 6, se analizaron las formas de la vértebra de la serpiente de acuerdo a sus vistas y se propuso una morfología que cumpliera con tener dicho mecanismo y con ser modulable al igual que en la columna vertebral de la serpiente, con la única diferencia de que la abstracción morfológica propuesta fuera modulable en todos los sentidos, con el fin de

generar una trama o textura que fuera flexible en respuesta a un movimiento. Las morfologías fueron realizadas digitalmente en el software parametrizado Rhinoceros 5.0.



**Figura 6 .** Cotilo en la vista A y el Cóndilo en la vista B

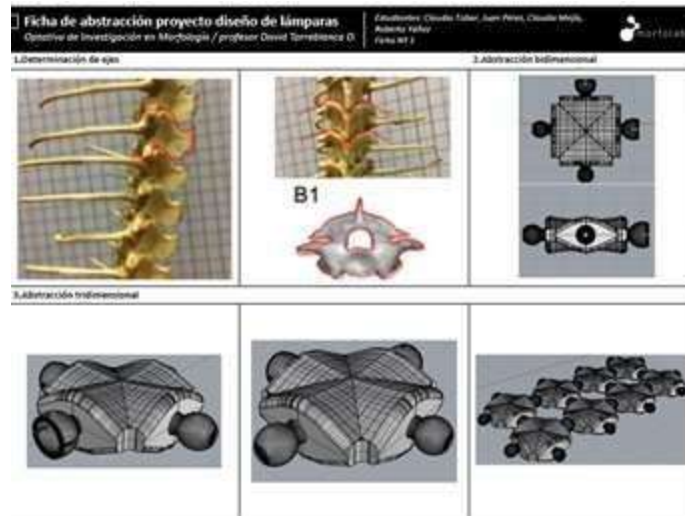
Fuente: Partes de la vértebra de la serpiente; que actúan como mecanismo de rótula y generan movimiento.  
Recuperado de:[https://www.researchgate.net/figure/General-structures-of-a-trunk-vertebra-of-a-typical-extant-colubrid-snake-A-cranial\\_fig2\\_237613257](https://www.researchgate.net/figure/General-structures-of-a-trunk-vertebra-of-a-typical-extant-colubrid-snake-A-cranial_fig2_237613257)



**Figura 7.** Ficha de abstracción 2, alternativa que cumplía los requerimientos, pero restringía movimientos.  
Fuente: Autoría propia

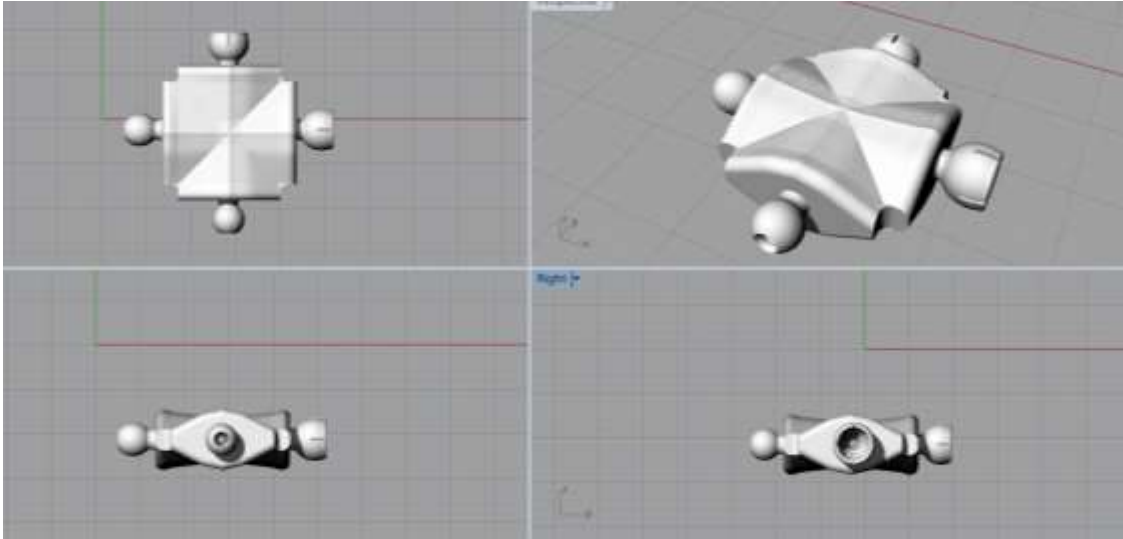
Con base al hallazgo de que la solución morfológica debe ser flexible por su forma y no por su material se desarrolló una nueva alternativa que cumpliera con ser flexible, modulable y que su material fuese rígido. Como se puede observar en la figura 8 la alternativa propuesta cumplía con el mecanismo macho – hembra de rotación que lleva integrado la serpiente en sus vértebras, sin embargo, no se consideró que esta morfología fuera la más óptima ya que al ser fabricada se evidenció que se restringía movimientos laterales por tener dos puntos de

contacto y para hacer el ensamble modulable se requería que la alternativa final fuera una morfología más flexible y manipulable.



**Figura 8.** Ficha de abstracción 1, morfología abstraída con mecanismo de rótula integrado  
Fuente: Autoría propia

Teniendo en cuenta estos hallazgos se desarrolló una morfología apta para realizar más impresiones con las que se validó de manera efectiva la flexibilidad por medio del movimiento rotativo lateral y vertical, como se puede observar en la figura 9 la morfología consta del mecanismo de rotula macho - hembra y puede ser modulable para generar una trama o malla a pequeña escala que sea aplicada en la zona metatarsal de la planta del pie y pueda mejorar la flexibilidad de la suela del calzado deportivo o tener aplicaciones en diferentes campos.



**Figura 9.**Modelo digital final de abstracción del referente elegido. Fuente: Autoría propia

### **6.3 Obtención del modelo físico**

#### **6.3.1 Acercamiento a las tecnologías de fabricación digital**

En el proceso de experimentación se realizaron pruebas de impresión por medio de la tecnología FDM (por sus siglas en inglés, *Fused Deposition Modeling*) o Deposición de Hilo Fundido, dichas pruebas se realizaron antes de imprimir las abstracciones morfológicas del referente ya que la intención fue comprobar las propiedades flexibles que ofrece el proceso de fabricación según la morfología a fabricar y el material de impresión, al mismo tiempo se identificaron también las limitaciones que tiene dicha tecnología ya que para validar los prototipos a una escala mayor funcionó, al contrario de imprimir a una escala menor con la que no funcionaba ya que dicha tecnología no ofrece la precisión ni la

nitidez en los acabados requerida para que la morfología fabricada funcionara de manera correcta.



**Figura 10.** Primera prueba impresa; probeta de material TPU, material de impresión tipo elastómero.  
Fuente: Autoría propia

Sin embargo, después de haber identificado que no se trabajaría con material flexible se comenzaron a hacer impresiones de modelos en ABS (figura 12) que cumplieran con el mecanismo de rótula y generarán flexibilidad estando modulados en una trama o malla. Este módulo tiene una dimensión de 5 x 5 cm de ancho y largo y de espesor 2 cm, al ser ensamblado con otros iguales generan una trama flexible que funciona por medio de un mecanismo de rotación en el que se dan grados de libertad y estos generan el movimiento, al ser una trama, los ángulos de libertad que generan el movimiento de los módulos son agrupados y se suman desarrollando versatilidad, flexibilidad y una libertad de grados mayor a partir de un movimiento de rotación. Posteriormente a esta validación se realizó una impresión 3D por rayos UV en la impresora *Asiga Pro 75* con la que se llevó la morfología a una escala que se aplicará a la suela deportiva, con esto validamos que la tecnología ofrece las posibilidades de fabricar mecanismos morfologías complejas en tamaños pequeños.



**Figura 11.** Módulos juntos generando flexibilidad a partir de su mecanismo de rotación, material: ABS.  
Fuente: Autoría propia

Posteriormente a esta validación, se realizó una impresión 3D por rayos UV en la impresora *Asiga Pro 75* con la que se llevó la morfología a una escala que se aplicará a la suela deportiva, con esto validamos que la tecnología ofrece las posibilidades de fabricar mecanismos y morfologías complejas en tamaños pequeños. Como se puede observar en la figura 13 se presenta el mecanismo de rótula macho – hembra a pequeña escala y cumple con ser funcional generando flexibilidad por el movimiento al estar unido un módulo con otro.



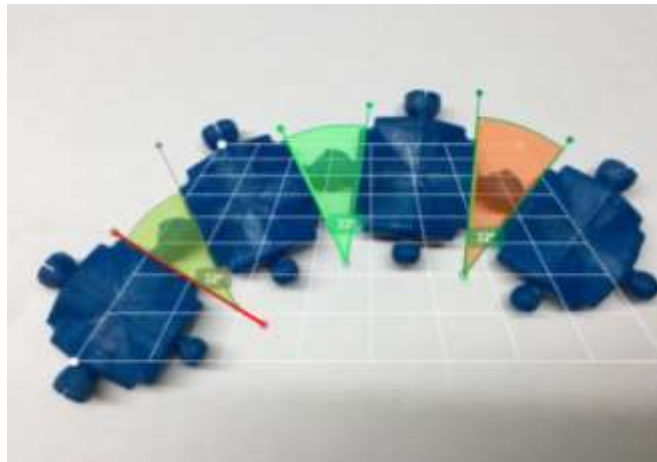
**Figura 12.** Módulos impresos por rayos UV a pequeña escala, dimensiones: 2 cm X 2 cm.  
Fuente: Autoría propia



## 6.4 Análisis de movimientos y ángulos de flexibilidad

### 6.4.1 Análisis en Kinovea

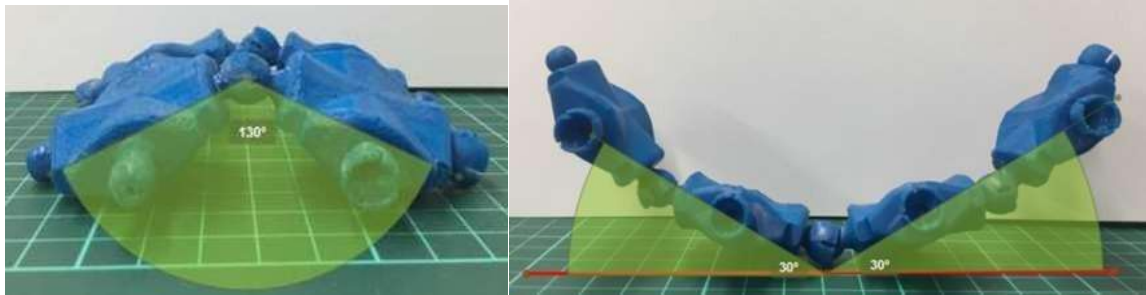
En el proceso de validación se realizaron análisis de ángulos de movimientos mediante el *Software* Kinovea, el cual ayuda a analizar movimientos biomecánicos, por ende, es una herramienta con la que se validó la funcionalidad y flexibilidad de los prototipos de una manera cuantitativa al conocer el valor de los ángulos de libertad que se generan en la modulación. Con fotos de los modelos impresos y se identificó que las morfologías al ser ensambladas generan ángulos de libertad de movimiento en los ejes transversal y longitudinal. Como se puede observar en la figura 14 se comprobó que en el eje transversal se dan movimientos por medio de un ángulo de flexión. Además, agrupada la morfología de manera lineal se hace más notorio su movimiento y sus ángulos de flexión aumentan por la agrupación de varios elementos y se generan movimientos de toda la trama con ángulos más grandes.



**Figura 13.** Módulos ensamblados, ángulos de libertad material: ABS, para permitir que los movimientos sean más naturales, pero protegiendo el pie de movimientos antinaturales.

Fuente: autoría propia

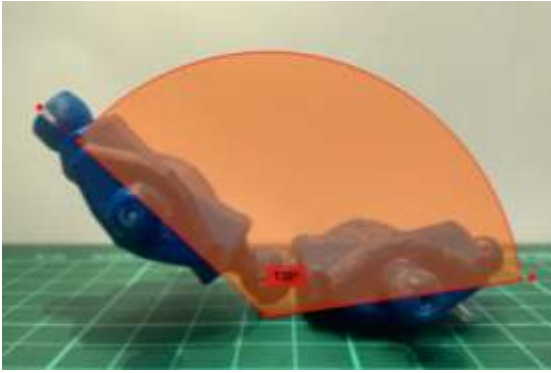
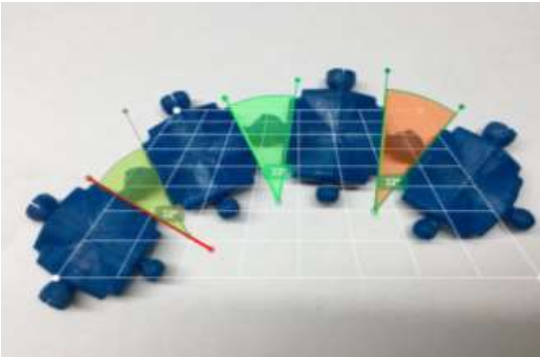
Otra forma de agrupación dio como resultado que en el eje longitudinal o vertical se tuviera un ángulo de movimiento de  $130^\circ$  y agrupados los módulos en una trama se tuviera un primer ángulo de  $30^\circ$ .



**Figura 14.** Módulos ensamblados, ángulos de libertad que genera la modulación en una posición de flexión, material: ABS.  
Fuente: Autoría Propia

Como se puede observar en la tabla 1, se ha realizado la comparación en relación a los ángulos de libertad que se dan en los ejes transversales y longitudinales, estos ángulos se generan debido a que los módulos están enlazados, además de la disposición de dichos módulos en los ejes ya mencionados; En el eje longitudinal ofrece ángulos de libertad de  $0^\circ$  a  $130^\circ$  a ambos lados con respecto a un punto fijo, siendo este un movimiento que podría servir para ayudar al mecanismo Windlass que se da en el pie, ya que su movimiento se da en el eje longitudinal, y permite que se dé la flexión que hace el pie al caminar o correr; mientras que en el eje transversal al generar una trama con los módulos enlazados se dan unos ángulos de libertad de  $0^\circ$  a  $33^\circ$ , siendo la modulación flexible también en el sentido transversal, esto genera buena respuesta a los movimientos bruscos de torsión que se aplican en la suela del calzado para fútbol en ciertas ocasiones donde hay riesgo de lesión, en estas ocasiones un buen desempeño de la forma podría prevenir dichas lesiones.

**Tabla 1.** Ángulos de libertad de los módulos enlazados en una trama, analizando dichos ángulos en los ejes transversales y longitudinales.

EJES	IMAGEN	ÁNGULOS DE LIBERTAD
LONGITUDINAL		0° - 130°
TRANSVERSAL		0° - 33°

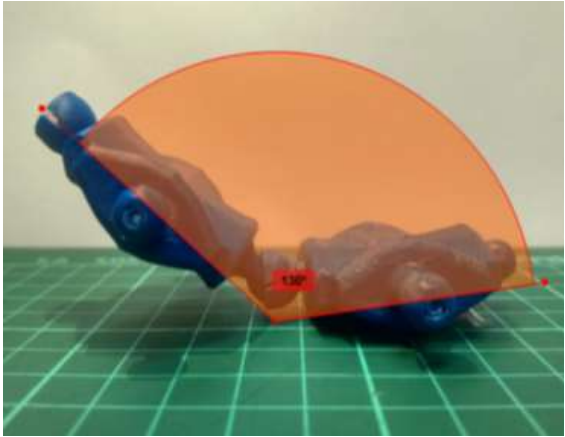
**Fuente:** Elaboración Propia

Con la información generada por la comparación anterior, se procede a realizar una nueva comparación, en relación a los movimientos y ángulos naturales que se generan en el pie en el eje transversal al caminar o correr, ya que este es un movimiento muy importante y comprometido al momento de realizar la práctica, como se puede notar en la tabla 2 los ángulos naturales del pie al momento de realizar la flexión en el eje transversal, tomando como centro la zona metatarsal, en su punto máximo es de 130° lo que no indica que este es

un límite natural de flexión en el pie, lo que nos indica que no se puede superar este ángulo de flexión, ya que se podrían ocasionar diferentes lesiones o cargas, fatigas musculares; Ahora, los guayos convencionales que se utilizan en la práctica de fútbol, ofrece unos ángulos de flexión en la zona metatarsal del pie de  $125^\circ$ , esto, aunque permite realizar movimientos necesarios a la hora de la práctica deportiva, tiene un límite inferior al del pie, lo cual es importante, para proteger del pie los límites de flexión anteriormente mencionados, sin embargo, este ángulo máximo de flexión, restringe la realización de movimientos naturales que el pie realiza, por ende, podría restringir al jugador de realizar dichos movimientos o realizar mayores esfuerzos para realizarlos, lo que llevaría al deportista a generar una posible fatiga y desgaste muscular. Mientras que los ángulos de flexión en los módulos enlazados con el mecanismo macho - hembra, ofrecen  $130^\circ$  de flexión en el eje transversal, siendo esto muy positivo, ya que alcanzaría el ángulo de flexión máximo que se genera en el pie ( $130^\circ$ ) al momento de realizar el mecanismo Windlass, al correr o caminar, además de ofrecer dicha flexión, también protege a la zona metatarsal de sobrepasar dicho límite de flexión natural, reduciendo las cargas por esfuerzo que se generan en el deportista, sobretodo en el pie; Ahora, en comparación con el ángulo que se dan en la suelas convencionales de fútbol el cual es de  $125^\circ$  en su límite, en el eje transversal, se puede observar que los ángulos de flexión que ofrecen los módulos al ser enlazados, sobre dicho eje transversal, se optimizan  $5^\circ$ , siendo el de los módulos de  $130^\circ$  en su punto límite, lo que se puede deducir, que estos módulos al ser enlazados en un trama y aplicados a la zona metatarsal de la suela del calzado para fútbol, podrían mejorar la flexibilidad de dicha zona, optimizando tanto el rendimiento del deportista, como la eficiencia del calzado deportivo al momento de realizar la práctica de fútbol.

**Tabla 2.** Comparación de los ángulos de libertad que se dan en el pie (movimiento natural), en la suela del calzado deportivo para fútbol y de los módulos enlazados en una trama, analizando dichos ángulos en el eje transversal.

PARTE	MOVIMIENTO (EJE LONGITUDINAL)	ÁNGULOS DE LIBERTAD
PIE	 <p>A photograph of a human foot from a lateral perspective. A red line extends from the heel to the ball of the foot, and another red line extends from the ball of the foot to the toes. A red arc between these two lines indicates an angle of 130 degrees. The area between the foot and the ground is shaded in light orange.</p>	0° - 130°
MÓDULOS	 <p>A photograph of a football shoe sole from a lateral perspective. A red line extends from the heel to the ball of the shoe, and another red line extends from the ball of the shoe to the toes. A red arc between these two lines indicates an angle of 125 degrees. The area between the shoe sole and the ground is shaded in light orange.</p>	0° - 125°

<p>GUAYOS</p>		<p>0° - 130°</p>
---------------	---	------------------

**Fuente:** Elaboración Propia

Los módulos ensamblados generan movimientos en los ejes longitudinal y transversal lo cual es fundamental ya que el movimiento natural del pie al caminar o correr es una flexión en sentido vertical, por consiguiente, se evidenció que la flexibilidad de la modulación es coherente con el movimiento natural del pie, lo que nos da indicios de que si se puede mejorar la flexibilidad de la suela de calzado de fútbol.

Sin embargo, Este proceso de abstracción realizado en el proyecto, al ser experimental, no culmina en el final del proceso investigativo, al contrario, y siendo consecuentes con la teoría investigativa, abre diferentes aplicaciones a futuros trabajos de investigación en el desarrollo de nuevos productos; además de esto, la investigación da la posibilidad continuar analizando diferentes formas de fabricación, con el fin de generar a partir del diseño, una producción en masa, para abarcar más mercado deportivo a nivel mundial, que solo los deportistas de alto rendimiento, ayudando a mejorar las diferentes problemáticas de salud (lesiones, fatigas musculares) que genera el calzado para fútbol.

## CONCLUSIONES

- El funcionamiento de la columna vertebral de la serpiente nos permitió un acercamiento a la solución del problema identificado el cual es la flexibilidad en la suela del calzado de fútbol, además permitiría la optimización de la práctica del fútbol para los deportistas semiprofesionales y de alto rendimiento.
- Se debe considerar que las siguientes simulaciones y probetas, puedan generar matrices, que permitan optimizar aún más, los movimientos y la flexibilidad, tanto de la forma como de la suela del calzado de futbol.
- En la trayectoria investigativa y experimental del proyecto se identificó que las morfologías abstraídas cumplen con la mayoría de los objetivos propuestos en la investigación.
- Por medio de la experimentación realizada y los resultados obtenidos con la agrupación de las diferentes morfologías propuestas pudimos identificar que era necesario la construcción de una probeta que permita generar mayor optimización en el movimiento y la flexibilidad cuando esté agrupada.
- Toda la flexibilidad que genera la manipulación de la modulación con movimientos en los ejes transversales y longitudinales ayudan a mejorar el desempeño funcional de los ángulos de flexión en la suela del calzado para fútbol, ya que al ser aplicados a la suela permite realizar los movimientos del pie al correr o caminar de una manera más natural y segura para el usuario.

## REFERENCIAS

- (1) Alfaro, V. (24 de 10 de 2016). Pies y fútbol: elegir bien la bota de fútbol previene lesiones . Recuperado de: <http://www.efesalud.com/pies-futbol-elegir-bien-la-bota-futbol-previene-lesiones/>
- (2) Alonso, S. (29 de 12 de 2014). Nike Magista: equipo de diseño empuja la innovación a otro nivel y obliga a la competencia a sacudirse Recuperado de: <http://www.diconexiones.com/nike-magista-como-un-equipo-de-diseno-empuja-la-innovacion-a-otro-nivel-y-obliga-a-la-competencia-a-sacudirse/>
- (3) Alvarado, R. G. (2012). Fabricación digital de modelos constructivos: análisis de equipos y procesos. *Revista Facultad de Ingeniería*, (59), 145-157
- (4) .Arenas, N. H. (5 de 5 de 2014). Influencia de la superficie de juego, botas y otras variables en la producción de lesiones por mecanismo indirecto de la extremidad inferior en el fútbol. Recuperado de: <http://repositorio.ucam.edu/bitstream/handle/10952/1077/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .España, Murcia: Universidad católica San Antonio.
- (5) Britez, J. (2013). Natación: ¿Pulverización de récords o doping tecnológico? In *X Congreso Argentino y V Latinoamericano de Educación Física y Ciencias (La Plata, 2013)*.
- (6) Figueroa, R., & Müller-Karger, C. M. (2007). Análisis de esfuerzo por el Método de Elementos Finitos en el Proceso de Diseño de Pie Artificial. In *IV Latin American Congress on Biomedical Engineering 2007, Bioengineering Solutions for Latin America Health* (pp. 732-735). Springer. Germany: Berlín, Heidelberg.
- (7) Hennig, E, Zulbeck, O (1999). The influence of soccer boot construction on ball velocity and shock to the body. Germany: Biomechanics laboratory, University of Essen.



- (8) HICKS, J. H. (1953). La mecánica del pie. II. Las articulaciones. *J. Anat.*, London, 87, 345-357.
- (9) Living, A. (11 de 09 de 2017). *Espacioliving*. Recuperado de:  
<http://www.espacioliving.com/1071070-diseno-industrial-y-deporte-de-alta-competencia>.
- (10) Luhtanen, P. (3 de 04 de 2004). Aspectos Biomecánicos del Rendimiento en el Fútbol . Recuperado de: <https://g-se.com/aspectos-biomecanicos-del-rendimiento-en-el-futbol-450-sa-i57cfb27146be5>
- (11) Lees, A; Kewley, P. The demands of soccer boot. *Science and Football II.*: 335-340, London, 1993
- (12)Mazo, E. P., Marín, M. A., & Flórez, J. D. J. (2016). Biomimética o la traducción de los fenómenos biológicos al diseño. *Iconofacto*, 11(16), 201-212. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana
- (13) Oriozabala-Brit, J. A., & del Mar, M. Oportunidades de la fabricación aditiva para optimizar el diseño de productos.
- (14) Riechmann, J. (2003). BIOMÍMESIS: un concepto esclarecedor, potente y persuasivo para pensar en la sustentabilidad. *El Ecologista*, 28-31
- (15) Torreblanca Díaz, D. (2016). Tecnologías de fabricación digital aditivas, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos. *Iconofacto*, 118-143. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana
- (16) Vicén, J., Garrigós, J. D. C., González, C., & Salinero, J. J. (2012). La biomecánica y la tecnología aplicadas al calzado deportivo. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Juan\\_Salinero/publication/239526613\\_La\\_biomecanica\\_y\\_la\\_tecnologia\\_aplicadas\\_al\\_calzado\\_deportivo/links/0c9\(6\),0](https://www.researchgate.net/profile/Juan_Salinero/publication/239526613_La_biomecanica_y_la_tecnologia_aplicadas_al_calzado_deportivo/links/0c9(6),0). Madrid: Universidad Camilo José Cela.

## ANEXO 1

# MEJORAMIENTO DE LA SUELA DE CALZADO PARA FÚTBOL A TRAVÉS DE LA BIOMIMÉTICA Y LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DIGITAL.

*Simón Orozco Henao, Sebastián Rueda  
Guerra*

Línea de investigación en Morfología experimental, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

### **Resumen**

En el presente proyecto investigación se desarrolla una morfología, empleando la biomimética como herramienta, con el fin de proponer alternativas de solución a la poca flexibilidad de la suela del calzado deportivo de fútbol, que permita prevenir lesiones musculares y articulares a quienes practican este deporte. Para esto se realizaron observaciones en la naturaleza con la intención de encontrar un referente que cumpliera en tener en alguno de sus mecanismos el principio de flexibilidad, con el fin de abstraer el principio natural de movimiento que se aplicaría posteriormente a un modelo. La geometría abstraída, fue digitalizada y modelada en softwares parametrizados 3D para luego fabricarlas usando impresión 3D para generar prototipos de ensayo con los que se analizaron las posiciones, movimientos y los ángulos de libertad que se generaron al ser ensambladas en una trama. Se encontró que, a través de las morfologías ensambladas se pueden mejorar los ángulos de flexión tanto longitudinales como transversales de la suela del calzado para fútbol, además de tener un control sobre ellos para que no se generen movimientos antinaturales al momento de los deportistas practicar el juego.

**Palabras Clave:** *diseño industrial; biomimética; tecnologías de fabricación digital (TFD); calzado deportivo.*

## 1.

### INTRODUCCIÓN

En el contexto mundial del deporte, el desarrollo y diseño de calzado de alto rendimiento está en un momento de auge ya que se están combinando las formas de creación y fabricación con diferentes morfologías, materiales y tecnologías, mejorando el rendimiento de los deportistas y generando nuevas tendencias en los mercados (1-6). Sin embargo, su producción en masa convencional arroja al mercado suelas que no generan la flexibilidad apropiada para realizar diferentes movimientos (correr, caminar, esprintar), por lo tanto, no ofrecen un buen desempeño al deportista. De acuerdo con lo anterior se plantea una investigación en la cual se pudieran encontrar soluciones morfológicas teniendo presente la biomimética, el diseño industrial y las tecnologías de fabricación digital. La figura 1 no es necesaria (además que no se referenció en el texto). Les hace falta mucha más información del estado del arte, ojo que acá debe ir marco conceptual y estado del arte.

El objetivo de este trabajo desarrollar alternativas para mejorar el desempeño funcional de la zona metatarsal de la suela del calzado de fútbol a través de la integración de la biomimética y las tecnologías de fabricación digital; además, Esta investigación es relevante en el contexto de investigación ya que brinda la información necesaria para diseñar y desarrollar alternativas morfológicas específicamente para solucionar temas de flexibilidad en los puntos críticos de la suelas de calzado deportivo, por medio de las tecnologías de fabricación digital y utilizando este proceso como medio de producción.

## 2.

### METODOLOGÍA

En este proyecto de investigación se llevó a cabo una metodología de tipo científica-experimental que se enfocó en mejorar el desempeño funcional de la zona metatarsal de la suela de calzado de fútbol a través de la identificación de principios en la naturaleza que permitieron disminuir la rigidez de la suela del calzado en la zona mencionada anteriormente. Por medio de la formalización de estos principios en morfologías, se abstraieron las funciones del referente elegido y se elaboraron modelos digitales modulares que generaban flexibilidad por medio de movimientos de rotación, posteriormente dichos modelos fueron impresos en 3D para validar el desempeño funcional que tenían, además de esto se realizaron también análisis en el software

Kinovea con el que se identificó información acerca ángulos de flexibilidad y de cómo se comportan las morfologías al ser expuestas a movimientos.

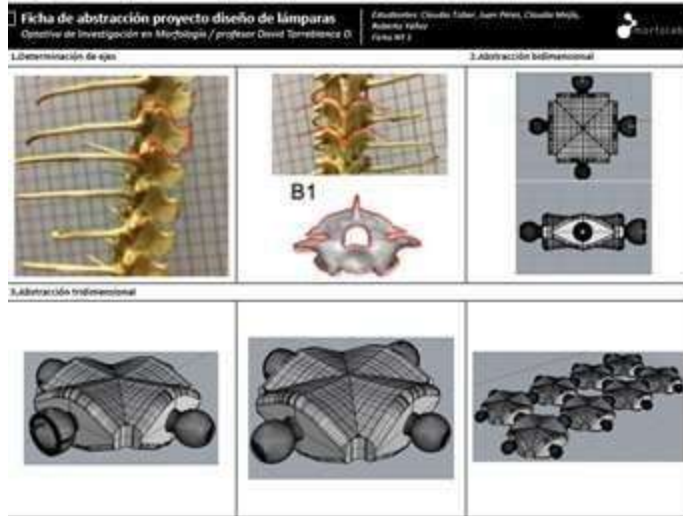
### *2.1 Identificación del referente*

Se realizó inicialmente la identificación de referentes morfológicos de la naturaleza con potencial de aplicación de acuerdo a la necesidad requerida que es un movimiento de rotación controlado, para lo cual se realizó una visita a la colección de reptiles del Museo de ciencias naturales La Salle ubicado en el Instituto Tecnológico Metropolitano de la ciudad de Medellín en la que se utilizó el estereoscopio (EUROLAB Mod. NSZ 405d) para observar los referentes y su funcionamiento de una forma más detallada. Con esta información se identificaron características con las que se evaluó la viabilidad de trabajar con los referentes elegidos con base a las herramientas que se tenían a disposición. se concentró la investigación en buscar un referente que cumpliera con una morfología que aportará la propiedad de ser flexible en respuesta a una serie de movimientos y con la que se pudiera realizar una abstracción morfológica.

### *2.2 Abstracción y modelación*

La abstracción del referente se realizó a través de una ficha de abstracción (Figura 2) que permitió extraer la forma a partir de la imagen del referente elegido (vértebra serpiente) y relacionarlo con la modelación de la morfología, basada en principio de flexibilidad del cuerpo de la serpiente. Esta morfología se representa a través de un módulo, diseñado digitalmente en el programa Rhinoceros

5.0, teniendo un acercamiento a la generación de la pieza y analizar cómo se comportan los módulos de forma ensamblada, que se consigue por medio de un mecanismo tipo rótula macho - hembra que permite la rotación (Figura 3) y por ende permite la flexibilidad requerida para el modelo de trama.



**Figura 1.** Ficha de abstracción del referente elegido y propuesta de modelo

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de la observación de los referentes naturales disponibles determinaron, con base al análisis de las fichas descritas en la metodología se determinó que el referente natural a emplear para este trabajo es la vértebra de la falsa coral (*oxyrhopus petolarius*). El cual se observa en la Figura 1.



**Figura 2.** Fotografía del esqueleto de una serpiente, donde se conservan las uniones entre las partes del esqueleto.

Por medio de la observación y el análisis del funcionamiento de las vértebras (3) unidas entre ellas se identificó que el movimiento que generan es coherente con los requerimientos de flexibilidad de la investigación, ya que, permiten que la serpiente tenga movimientos ondulares laterales y verticales los cuales son los adecuados para los movimientos que presenta la suela del calzado de fútbol. Por otra parte, la manipulación de todo el esqueleto de la serpiente permitió reconocer los límites que tiene las vértebras en cuanto a los movimientos ondulares sin embargo esto lo hace más eficiente en términos de flexibilidad ya que mantiene los movimientos controlados.

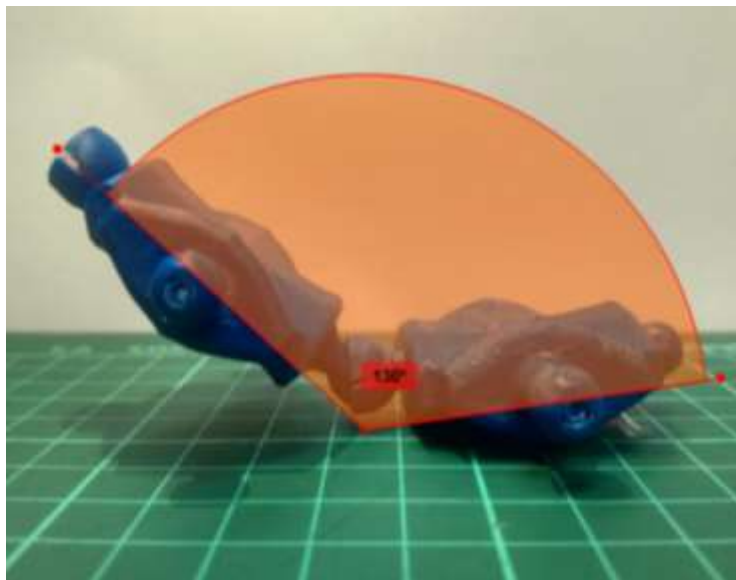
### *3.1 Obtención del modelo físico*

Con base a la experimentación de abstracción morfológica y al proceso de impresión 3D (4) realizados en el transcurso del proyecto se identificaron problemas morfológicos en los primeros módulos; Al ser corregidos se logró llegar a una morfología, un módulo que cumpliera con el requerimiento de generar flexibilidad al ser modulada, por medio de un principio natural; Este módulo fue impreso en ABS (Figura 3) y tiene una dimensión de 5 x 5 cm de ancho y largo y de espesor 2 cm, que al ser ensamblado con otros iguales generan una trama flexible en el que se dan grados de libertad que generan el movimiento (Figura 3); Al ser una trama, los movimientos, esfuerzos y ángulos de cada módulo se traducen en una sola fuerza y se suman desarrollando versatilidad, flexibilidad y una libertad de grados mayor a partir del movimiento de rotación que tienen los módulos al ser ensamblados.



**Figura 3.** Módulos juntos generando flexibilidad a partir de su mecanismo de rotación, material: ABS.  
Fuente: Autoría propia

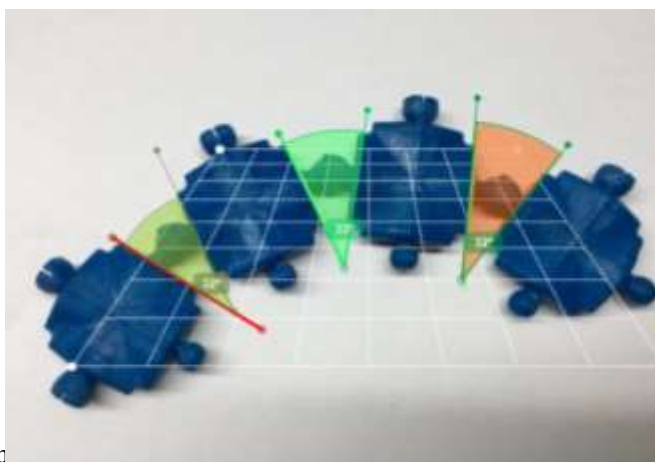
Los ángulos de libertad generados por el movimiento de rotación de los módulos fueron los factores a elegidos para medir la eficiencia, versatilidad, funcionalidad y flexibilidad que ofrecen los prototipos ensamblados, esta información fue tomada por medio de un software llamado Kinovea (Figura 4), el cual ayudó a analizar de una manera cuantitativa los valores de los ángulos de libertad que se generan en la modulación, de qué manera se podían controlar y que límites deben de generar dichos ángulos para que no se realicen movimientos antinaturales .



**Figura 4.** Módulos ensamblados, ángulos de libertad que genera la modulación en una posición de flexión (tomados de KINOVEA), material: ABS  
Fuente: Autoría propia

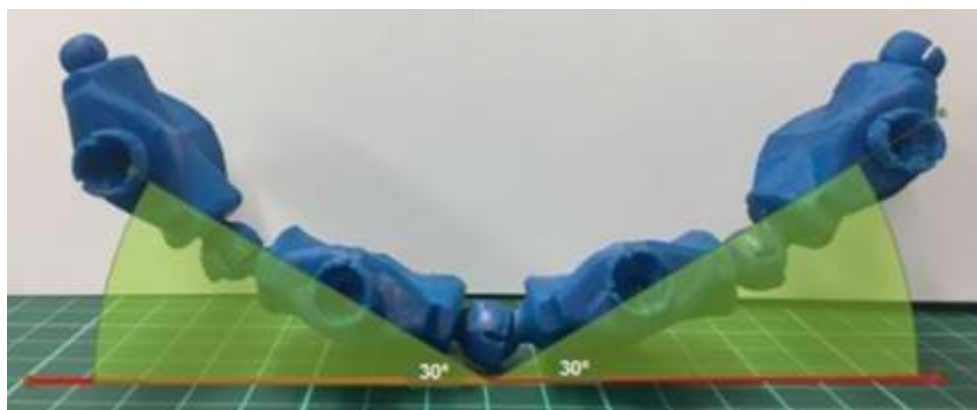
Los módulos ensamblados generan movimientos en los ejes longitudinal y transversal, lo cual es fundamental ya que el movimiento natural del pie al caminar o correr es una flexión en sentido vertical (7), por consiguiente, se evidenció que la flexibilidad del módulo en una trama, es coherente con el movimiento natural del pie, lo que nos arrojó que si puede mejorar la flexibilidad de la suela de calzado de fútbol a través de morfología abstraída. Sin embargo, la modulación es flexible también en el sentido transversal (Figura 5), esto genera, además, una buena respuesta a los movimientos bruscos como los de torsión o agarre a la superficie, que se aplican en la suela del calzado para futbol en ciertas ocasiones donde hay riesgo de lesión, en estas ocasiones, un buen desempeño de la forma y la función podría prevenir dichas lesiones y

optimizar los movimientos que se generan en la práctica del fútbol y por ende el desempeño del jugador.



**Figuras 5.** Módulos ensamblados para que los movimientos sean más naturales, pero protegiendo el pie de movimientos antinaturales.  
Fuente: Autoría Propia

Ahora bien, si los módulos ensamblados entre sí, generando una trama con buena flexibilidad, hay que tener en cuenta que en estos movimientos también existen unos límites de flexión, que exigen al máximo las articulaciones (5), y que si se lleva a tal punto de exigencia a sobrepasar dichos límites, puede ocasionar en los deportistas lesiones graves, por esta razón, y gracias a la posibilidad en la modelación digital de variar parámetros del diseño, como por ejemplo variar el cuello de las uniones hembra, permite que los límites de flexión de la trama (en cuanto a la repetición de los módulos) puedan ser controlados (Figura 6), según las necesidades que se hayan observado para la realización de la práctica.



**Figuras 6.** Módulos ensamblados, ángulos de libertad que genera la modulación solamente en un sentido, material: ABS.  
Fuente: Autoría Propia



Este proceso de abstracción realizado en el proyecto, al ser experimental, no culmina en el final del proceso investigativo, al contrario, y siendo consecuentes con la teoría investigativa, abre diferentes aplicaciones a futuros trabajos de investigación en el desarrollo de nuevos productos; además de esto, la investigación da la posibilidad continuar analizando diferentes formas de fabricación, con el fin de generar a partir del diseño, una producción en masa, para abarcar más mercado deportivo a nivel mundial, que solo los deportistas de alto rendimiento, ayudando a mejorar las diferentes problemáticas de salud (lesiones, fatigas musculares) que genera el calzado para fútbol.

#### 4.

#### CONCLUSIONES

- El funcionamiento de la columna vertebral de la serpiente permite un acercamiento a la solución del problema identificado el cual es la flexibilidad en la suela del calzado de fútbol, además permitiría la optimización de la práctica del fútbol para los deportistas semiprofesionales y de alto rendimiento, además de la reducción de riesgos a posibles lesiones.

- Se considera que la morfología de este patrón es coherente con la forma del referente elegido y la suela, ya que permite mejorar la flexibilidad de la pieza a través de la optimización y control de los grados de flexión y gracias a la modelación digital se acopla a las medidas establecidas en las suelas; Por medio de la fabricación se comprobó la funcionalidad en cuanto a la flexibilidad que debe tener la morfología abstraída de la vértebra de la serpiente.

- Se debe considerar que las siguientes modelaciones y probetas, puedan generar diferentes matrices, que permitan optimizar aún más, los movimientos y la flexibilidad, tanto de la forma como de la suela del calzado de futbol.

- Toda la flexibilidad que genera la manipulación de la modulación con movimientos en los ejes transversales y longitudinales ayuda a mejorar la flexibilidad de la suela del calzado para fútbol, ya que al ser aplicados a esta podría permitir realizar los movimientos del pie al correr o caminar, (además de movimientos de torsión) de una manera más natural y segura para el usuario; Sin embargo, se hacen necesarios trabajos complementarios que permitan apoyar esto.

- Gracias a las simulaciones digitales, los ángulos de flexión que se generan al unir los módulos pueden variar, lo que permite tener control sobre estos ángulos, estas variaciones se dan en base a las necesidades que se tengan.

- La trama generada a través de los ensambles de la morfología, no solo funcionaria en la zona metatarsal como se propone, sino también, variando sus dimensiones, se podría ubicar en diferentes puntos críticos que presenta el calzado deportivo de alto rendimiento.

