

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

Unidad Valle de las Palmas



DISEÑO DE UN ELEMENTO MECÁNICO INSPIRADO EN EL FÉMUR DEL INSECTO CALLIPTAMUS BARBARUS

Tesis que para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presenta:

Edgar Ricardo Meza Aguilar

Director de Tesis:

M. en C. Juan Antonio Paz González

Tijuana, B.C.,. Febrero 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

DISEÑO DE UN ELEMENTO MECÁNICO INSPIRADO EN EL FÉMUR DEL INSECTO CALLIPTAMUS BARBARUS

Edgar Ricardo Meza Aguilar

Agradecimientos

Antes que nada quiero agradecer a todas las personas que creyeron en mí, y a las que no también, a lo largo de toda mi carrera y a todas las personas que han estado a mi lado a pesar de todas las dificultades que se presentaron a lo largo de todo este camino. Gracias a todos.

Con mucho aprecio y orgullo, puedo decir que soy hijo de dos grandes ejemplos a seguir, mi padre y mi madre, José Ricardo Meza Ley y Evelia Aguilar Franco, sin ellos, sin sus consejos, sin sus jaladas de oreja, sin sus nalgadas, sin su apoyo y sin su amor, no sería lo que soy ahora, de eso estoy seguro, gracias por su apoyo y preocupación en cada proyecto en el que me involucro y en cada momento de mi vida, gracias por todo eso, y espero seguir contando con mis dos viejitos. Muchas gracias también a mis hermanas Iliana Guadalupe Meza Aguilar y Angélica Sarahi Meza Aguilar, son parte importante de mi vida y quiero que lo tengan siempre presente, las quiero mucho.

Quiero agradecer a una persona que ha estado conmigo, y me ha acompañado en este gran camino y también me apoya en todo lo que hago espero seguir contando con tu apoyo incondicional por mucho más tiempo, gracias por ser mi compañera, mi novia y una gran amiga Elva López. A pesar de los malos momentos, son los buenos momentos los que predominan. Gracias por aguantarme y por ser parte de mi vida.

Gracias a mis compañeros de ingeniería mecánica, por su apoyo en esta tesis, en las presentaciones y por sus correcciones y consejos sobre el estudio que se realizó y a lo largo de toda la carrera ya que compartimos muchas experiencias que nos acercaban más a nuestros objetivos, claro como todas las experiencias buenas y malas, además de compartir el mismo salón por más de tres años ya son parte de mi familia. Aprovechando quiero agradecer a dos grandes amigos, que digo amigos hermanos que están siempre en las buenas y en las malas, y siempre escuchan todas mis penas y alegrías. Le debo mucho a estas dos grandes personas al Lic. Antonio Soto y al Lic. Idoel Valenzuela, espero seguir teniéndolos como mis hermanos.

Gracias a todos los profesores dentro de la universidad, en lo personal son muy grandes personas y son un gran equipo de trabajo, todos dentro de la institución. Son profesores, maestros y doctores, que nos dan su conocimiento y experiencia día a día, han sido unos muy grandes consejeros y gran parte de mi conocimiento es gracias a todos ustedes.

Gracias al Dr. Abundes Pliego, por ser mi primera motivación para adentrarme en esta carrera tan hermosa, de la cual me he encariñado y por nada dejare. Gracias por esa pasión que nos

entregó durante su estancia en esta institución y todos los conocimientos que nos compartió, gracias por ser una gran persona y acompañarnos durante este camino, espero muchos más proyectos con usted.

Quiero agradecer al M. C. Benjamín González Vizcarra, por apoyarnos durante toda la carrera y ser un gran profesor en las clases impartidas y por ese apoyo que se nos ha brindado durante toda su estancia en esta institución. Muchas gracias por sus consejos y por hablarnos con toda honestidad, aprecio su sinceridad y todo su apoyo, muchas gracias y mucho éxito.

También agradecer al master de masters, M. C. José Navarro que siempre está involucrado en los proyectos de ingeniería mecánica, gracias por estar siempre al pendiente, también por hacer las clases mucho más interesantes y siempre tener una respuesta para todo, y por siempre sacarnos de apuros muchas gracias profe se aprecia su compromiso y dedicación a su carrera, se le agradece.

Con aprecio agradezco al Dr. Manuel Rosel Solis, aunque no fue mucho lo que convivimos y fue poco el tiempo que trabajamos juntos, sus conocimientos fueron de gran importancia, sobre todo en el área de metrología y de comparación de resultados, gracias por su paciencia y por todo su tiempo, además de siempre tener las puertas abiertas.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mi director de tesis, asesor, profesor, amigo, compañero y gran consejero, al M. C. Juan Antonio Paz González, muchas gracias por todo su apoyo, no tengo palabras para agradecerle todo lo que me ha apoyado y en todo lo que hemos trabajado. Es una gran persona y siempre piensa en los demás, gracias por estar siempre al pendiente, y no solo de mí sino de todos sus alumnos a los que ha dado clase y a los que no también. Se nota con mucha facilidad que esta es su vocación, y que le gusta compartir sus conocimientos y también trabajar en la superación tanto personal como laboral día con día. Espero seguir contando con su apoyo, dentro y fuera de la escuela, y seguir disfrutando de su amistad muchas gracias por todo.

Esta universidad me toco la suerte de contar con un excelente equipo de trabajo, tanto compañeros como maestros, soy una persona muy agradecida y gracias por su paciencia y tiempo, por sus consejos y por todo el apoyo que me han otorgado.

Gracias familia, profesores, asesores, compañeros y amigos, gracias por su apoyo, paciencia y por sus consejos que sin su ayuda este trabajo no hubiera sido posible.

Índice

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	ix
Glosario	x
Nomenclatura.....	xii
Resumen.....	xiii
Abstract	xiv
Introducción	xv
Objetivo general.....	xvii
Objetivos particulares	xvii
Justificación	xvii
Capítulo 1 Estado del arte	2
1.1. Generalidades	2
1.2. Biomimética	3
1.2.1. Aplicación de la biomimética en la mecánica.	4
1.2.2. Origen de la biomecánica.....	5
1.2.3. Otras aplicaciones de la biomecánica	7
1.3. Calliptamus barbarus	10
1.4. Exoesqueletos	11
1.4.1. Biomimética y exoesqueletos	13
Bibliografía Capítulo 1	16
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	21
2.1. Diseño mecánico	21
2.2. Fases de diseño	21
2.3. Esfuerzos y deformaciones.....	23
2.3.1. Esfuerzo máximo principal.....	24
2.3.2. Esfuerzo mínimo principal	24
2.3.3. Esfuerzo de von mises.....	24
2.3.4. Deformación normal bajo carga axial.....	25
2.3.5. Módulo de elasticidad	26
2.3.6. Deformaciones de elementos sometidos a carga axial	27
2.4. Elemento finito.....	28
2.5. Diseño geométrico.....	30
2.6. Perfilometría mecánica.....	30
2.6.1. Curvas P y R.....	31

2.6.2.	Definición de Ra	33
2.6.3.	Definición de Rz	35
2.6.4.	Definición de Ry	36
2.7.	Comparador óptico (medición visual).....	37
2.8.	Manufactura.....	38
2.8.1.	Estereotomía.....	38
2.8.2.	Termoformado.....	39
2.8.3.	Modelo fabricado con material compuesto	40
2.8.3.1.	Moldeo por transferencia de resina auxiliado por vacío.	42
	Bibliografía Capitulo 2	45
	Capítulo 3. Metodología y caracterización dimensional del fémur.....	48
3.1.	Metodología	48
3.2.	Caracterización dimensional	49
3.3.	Perfilometría mecánica	49
3.4.	Comparación óptica	51
3.5.	Levantamiento 2D	52
3.6.	Dibujo 3D	53
3.7.	Propiedades físicas del modelo	54
	Bibliografía Capitulo 3	58
	Capítulo 4 Resultados	60
4.1.	Estudio de elemento finito	60
4.2.	Mallado del elemento estudiado	61
4.3.	Condiciones de frontera	61
4.4.	Resultados obtenidos por medio del estudio de elemento finito.....	62
4.5.	Fabricación del prototipo del fémur	67
	Bibliografía Capítulo 4	77
	Capítulo 5 Conclusiones y trabajos futuros	79
5.1.	Conclusiones	79
5.2.	Trabajos futuros	80
	Anexos.....	81
	Anexo A Equipos y materiales para el desarrollo del proyecto	82
A .1.	Equipo de perfilometría	82
A-2.	Equipo de comparador óptico	84
A-3.	Descripción del equipo de termoformado	85
A-4.	Descripción del equipo de infusión de resina	86

A -5.	Bomba de vacío	86
A-6.	Resina epoxica para infusión.-	88
A -7.	Manguera de Vacío PVC	89
A -8.	Película de embolsado de vacío	90
A -9.	Goma para bolsas de vacío sellador de cinta (alta temperatura)	90
A -10.	Cascaron de vacío (Peel Ply)	91
A -11.	Malla de infusión.	91
A -12.	Malla mejorada de infusión de resina	92
A -13.	Espiral de infusión	93
A-14.	Conector de silicona	94
A -15.	Líneas de amarre	95
A-16.	Depósito de infusión de resina.....	95
A-17.	Fibra de vidrio.....	96
	Bibliografía Anexos A.....	98
	Anexo B Planos levantamiento 2D.....	99
	Anexo C Planos de fabricación por estereotomía.....	102
	Anexo D Mediciones de perfilometro.....	106

Índice de figuras

Figura	Descripción	Página
1.1	Tren bala japonés Shinkansen mejorado con la aplicación de la forma del pico del Martín Pescador.	3
1.2	Simulador biomimético de locomoción animal terrestre.	4
1.3	Prótesis egipcia de dedo del pie.	5
1.4	Robot diseñado por Leonardo da Vinci.	6
1.5	Langosta <i>Gregaria schistocerca</i> que muestran grandes patas traseras especializadas para saltar.	8
1.6	Insecto falso palillo <i>Pseudoprosopia scabra</i> mostrando lo delgado de sus patas. Insecto con una gran capacidad para para saltar.	8
1.7	Grafica de músculos y fuerzas pasivas.	9
1.8	Insecto Calliptamus Barbarus.	10
1.9	Fémur y partes del grillo. a) Fémur del insecto a detalle y b) Partes o exoesqueleto de un grillo.	11
1.10	Exoesqueleto moderno para rehabilitación.	12
1.11	Rehabilitación por medio del uso de exoesqueletos.	13
1.12	El robot de seis patas, (a) LEMUR (Limbed Excursión móvil Utilidad Robot), que se desarrolla en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (Brett Kennedy, JPL), (b) el cangrejo de ocho patas en un acuario. (c) LEMUR puede utilizar una variedad de herramientas para llevar a cabo operaciones de montaje.	14
2.1	Metodología del proceso de diseño del elemento mecánico.	22

2.2	Grafica de esfuerzo-deformación para tres materiales con diferentes propiedades a) acero al bajo carbono, b) aleación de aluminio y c) material frágil típico.	26
2.3	Estudio de elemento finito en un gancho de carga.	29
2.4	Medición de cuerda con perfilómetro mecánico.	31
2.5	Uso de perfilometría en un recorrido específico.	31
2.6	Curva P.	32
2.7	Curva R.	32
2.8	Grafica en la que se muestra la línea media de una medición superficial.	32
2.9	Muestra de la línea central dentro de una medición superficial.	33
2.10	Función de x en comparación con la longitud de evaluación.	34
2.11	Descripción de partes obtenidas de una medición superficial, tales como lo son la función de x, línea central, perfil de rugosidad, longitud de evaluación y la medida aritmética de los valores absolutos.	34
2.12	Valles más bajos y picos más altos.	35
2.13	Muestreo superficial no continuo.	36
2.14	Descripción grafica de Ry.	36
2.15	Comparador óptico realizando una inspección de calidad y tolerancias.	37
2.16	Estereotomía en un automóvil Lamborghini Murciélagos a escala.	38
2.17	Termoformado al vacío: a) una hoja de plástico se suaviza con calentamiento; b) la hoja suavizada se coloca sobre una cavidad de molde cóncava; c) un vacío empuja la hoja hacia la cavidad; y d) el plástico se endurece al contacto con la superficie fría del	39

	molde, y posteriormente la pieza se elimina y recorta del resto del material	
2.18	Esquema del proceso de Moldeo por Transferencia de Resina (a) Preformado y colocación del molde (b) Impregnación y curado (c) Desmolde.	41
3.1	Espécimen a medir.	49
3.2	Contorno obtenido por medio del perfilómetro e importado a un programa CAD.	50
3.3	Fémur del grillo (50x comparador óptico).	51
3.4	Líneas trazadas comparadas con el comparador óptico.	51
3.5	Levantamiento 2D. Medidas reales del fémur en milímetros.	52
3.6	Partes del fémur dentro del croquis.	53
3.7	Imagen 3D del fémur del grillo.	53
3.8	Centro de la pieza, con sus ejes coordenados en X Y Z.	57
4.1	Modelo 3D de la placa importada a ANSYS.	60
4.2	Mallado del prototipo de fémur.	61
4.3	Fuerza aplicada, 1000N en dirección negativa en el eje y.	62
4.4	Deformación total.	63
4.5	Deformación direccional en x.	63
4.6	Deformación direccional en y.	64
4.7	Deformación direccional en z.	64
4.8	Equivalente de von-Mises (tensión elástica).	65
4.9	Tensión elástica máxima	65
4.10	Tensión elástica mínima.	65
4.11	Equivalente de von-Mises (esfuerzo).	66

4.12	Esfuerzo máximo.	66
4.13	Esfuerzo mínimo.	67
4.14	Modelado de superficie del fémur por medio de estereotomía.	68
4.15	Diferentes vista de la estereotomía fabricada para el prototipo a) vista isométrica y b) vista superior.	68
4.16	Proceso de expansión del polímero, a) inicio de la expansión dentro del molde para su retención, b) expansión nivel medio, c) expansión final y secado de la mezcla y d) extracción de la espuma para su procesamiento.	69
4.17	Esqueleto de cartón y espuma.	70
4.18	Ensamble de la espuma y del esqueleto, a) cortes realizados en la espuma, b) ensamble parcial sobre puesto y c) ensamble final sobre puesto.	70
4.19	Desbaste con un devastador manual a detalle (DREMEL) para acabado final de la espuma, a) desbaste inicial por procedimiento manual, b) pieza antes del desbaste y c) desbaste terminado.	71
4.20	Aplicación de pasta de relleno automotriz en el modelo de espuma. a) Mezcla de pasta de relleno automotriz catalizador, b) aplicación inicial de pasta de relleno automotriz, c) aplicación final del pasta de relleno automotriz y c) pieza completamente cubierta.	71
4.21	Resultado de modelado y de mediciones realizadas a) modelado 3D b) fabricación de prototipo por estereotomía y c) imagen aumentada del fémur estudiado.	72
4.22	Proceso de termoformado a) colocación, calentamiento al estireno b) aplicación de vacío y c) liberación de la pieza.	73
4.23	Molde obtenido por medio del termoformado de estireno calibre 30.	73
4.24	Capas aplicadas en la fabricación del material compuesto.	74
4.25	Aplicación de las capas de fibra de vidrio.	74

4.26	Prueba de vacío al sistema de infusión.	75
4.27	Proceso de infusión y aplicación de la resina.	75
4.28	Proceso de infusión terminado.	76
4.29	Infusión con bolsa de nylon.	76

Índice de tablas

Tabla	Descripción	Página
3.1	Mediciones tomadas por el perfilómetro (Mitutoyo CONTRACER CV-2000Series).	50
3.2	Propiedades físicas generales del modelo	54
3.3	Centro de masa del modelado	54
3.4	Ejes principales de inercia	54
3.5	Momentos principales de inercia	55
3.6	Momento de inercia respecto al centro de masa	55
3.7	Momentos de inercia	55
4.1	Estudio estático estructural.	66

Glosario

Alveolos: *m.* Cavidad, hueco. *m. Anat.* Cada una de las cavidades en que están engastados los dientes en las mandíbulas de los vertebrados.

Cardiopatías: *f. Med.* Enfermedad del corazón.

Caulíferos: *adj. Bot.* Dicho de una planta: De flores que nacen sobre el tallo.

Elongación: *f. Mec.* Alargamiento de una pieza sometida a tracción. *f. Mec.* Distancia que, en cada instante, separa a una partícula o cuerpo sometidos a oscilación de su posición de equilibrio.

Epoxica: *f.* Sustancia que reacciona cuando los mezclas con un catalizador o endurecedor.

Impregnado: *tr.* Penetrar las partículas de un cuerpo en las de otro, fijándose por afinidades mecánicas o fisicoquímicas. *El agua ha impregnado la moqueta.* *tr.* Mojar un cuerpo poroso de manera considerable.

Ortesis: Según la Norma UNE 11-909-90/1, adoptada de la ISO 8549/1, una ortesis es cualquier dispositivo aplicado externamente sobre el cuerpo humano, que se utiliza para modificar las características estructurales o funcionales del sistema neuromúsculo-esquelético, con la finalidad de mantener, mejorar o recuperar la función. Además, está en contacto permanente con el cuerpo humano, diferenciándola de los demás productos de apoyo. La palabra ortesis deriva del griego “ortho” que significa recto, enderezado o correcto. Es un término global que incluye dispositivos tanto dinámicos como estáticos.

Ortópteros: *adj. Zool.* Dicho de un insecto: Masticador, con un par de élitros consistentes y otro de alas membranosas plegadas longitudinalmente, y que tiene metamorfosis sencilla; p. ej., el saltamontes o el grillo.

Perfil de picos: *adj. Mat.* Proyección de una porción de perfil conectando dos puntos adyacentes de la intersección del perfil con la línea media.

Perfil de valles: *adj. Mat.* Porción descendente del perfil conectando dos puntos adyacentes de la intersección del perfil con la línea media.

Pico más alto: *adj. Mat.* Pico más alto de un perfil de picos.

Polinomial: *adj. Mat.* Que tiene forma de polinomio. Expresión compuesta de dos o más términos algebraicos unidos por los signos más o menos.

Prótesis: Según la Norma UNE 11-909-90/1, adoptada de la ISO 8549/1 una prótesis es un aparato externo usado para reemplazar total o parcialmente un segmento de un miembro deficiente o ausente. El término Protésica (Prosthetics) deriva del prefijo griego Pros, que indica “añadir a” del prefijo Thenai que significa “colocar, aplicar” y de la terminación Tics que indica el campo de actividad de la raíz de la palabra.

Resina: *f.* Sustancia sólida o de consistencia pastosa, insoluble en el agua, soluble en el alcohol y en los aceites esenciales, y capaz de arder en contacto con el aire, obtenida naturalmente como producto que fluye de varias plantas.

Tibia: *f.* Hueso principal y anterior de la pierna, que se articula con el fémur, el peroné y el astrágalo. *f. Zool.* Una de las piezas, alargada en forma de varilla, de las patas de los insectos, que por uno de sus extremos se articula con el fémur y por el otro con el tarso.

Nomenclatura

lm	Longitud de evaluación	σ	Esfuerzo [Pa]
Ra	La media aritmética de los valores absolutos	σ_1	Esfuerzo máximo principal [Pa]
Rz	Promedio de las alturas de pico a valle	σ_2	Esfuerzo mínimo principal [Pa]
Ry	Máxima altura del perfil	τ	Torque [Nm]
X	Eje coordenado horizontal	P	Carga, Fuerza [N]
Y	Eje coordenado vertical	A	Área [m ²]
Z	Eje coordenado de profundidad	L	Longitud [m]
P	Pico	ϵ	Deformación unitaria [m/m]
V	Valle	E	Módulo de elasticidad
$f(x)$	Función de x	δ	Deformación, desplazamiento [m]
$f(xi)$	Función de un xi	n	Valor que puede tomar cualquier numero como constante
Zi	Promedio de la diferencia entre el pico más alto y el valle más bajo de cinco sucesivas longitudes de muestreo		

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo del diseño de un elemento mecánico basado en la geometría del fémur del insecto *Calliptamus barbarus*. Se diseñó un prototipo tridimensional con el uso de conocimientos mecánicos y con la aplicación de softwares para visualizar el comportamiento del elemento mecánico sometido a una carga mediante el método de elemento finito, y la comparación de resultados. Se utilizó un sistema de medición a precisión para conocer las dimensiones exactas de la complexión del fémur, también se realizó el proceso de manufactura por medio de estereotomía y de infusión de resina, así como la fabricación de moldes por medio de termoformado.

En esta investigación se estudió como la naturaleza, por medio de la evolución, actúa para crear sistemas, estructuras y mecanismos, que ayudan a agilizar procesos o resolver problemas, tomando de este las bases para la aplicación de una nueva propuesta para la rehabilitación por medio de elementos mecánicas que sustituirán los elementos actuales de mecanismos convencionales.

Con los resultados de caracterización dimensionales se creó un modelo 3D basado en la geometría externa del fémur del insecto. La perfilometría mecánica se utilizó para tener el contorno exacto del fémur analizado con la finalidad de poder crear un modelo tridimensional y un modelo físico para poder comparar ambos resultados. Se implementó también, para hacer posible el dimensionamiento del fémur por las irregularidades con las que cuenta en su superficie, la medición por medio de comparador óptico se utilizó para observar los detalles y el arreglo del marco estructural con las que cuenta la extremidad que se analizó. El proceso de manufactura se realizó por medio de tres etapas: termoformado, estereotomía e infusión de resina. Con este proceso de manufactura se obtuvo la pieza física con las características desarrolladas dentro del modelo 3D. Se analizó cómo es posible cambiar la geometría de un elemento para mejorar sus propiedades mecánicas bajo las mismas condiciones de frontera, dando un diferente direccionamiento de cargas, lo cual demuestra que se puede reducir material sin afectar el rendimiento de una pieza mecánica, dependiendo del trabajo en el que se implementara. El fémur tiene la capacidad de distribuir los esfuerzos a lo largo de su geometría direccionando a la carga hacia los costados del fémur, que forma parte del exoesqueleto.

Abstract

This paper describes the design development of a mechanical element based on the geometry of the femur *Calliptamus barbarus* bug occurs. A three-dimensional prototype was designed with the use of mechanical knowledge and the application of software to visualize the behavior of the mechanical element subjected to a load using the finite element method, and comparison of results. a measurement system to accurately used to exact dimensions of the complexion of the femur, the manufacturing process making molds by thermoforming was also performed by sternotomy and resin infusion and.

In this research was studied as nature, through evolution acts to create systems, structures and mechanisms that help streamline processes or solving problems, making this the basis for the implementation of a new proposal for rehabilitation through mechanical elements that will replace the current elements of conventional mechanisms.

With the results of a 3D model dimensional characterization based on the external geometry of the femur insect created. Mechanical profilometry was used to have the exact contour of the femur analyzed with the purpose to create a three-dimensional model and a physical model to compare the two results. It was also implemented, to enable the sizing of the femur by the irregularities with which has on its surface, the measurement by optical comparator was used to observe the details and arrangement of the structural framework which has the tip was analyzed. The manufacturing process was performed by three stages: thermoforming sternotomy and resin infusion. With this manufacturing process the physical part with features developed within the 3D model is obtained. We discussed how you can change the geometry of an element to improve its mechanical properties under the same boundary conditions, giving a different routing loads, which shows that it can reduce material without affecting the performance of a mechanical part, depending on the job in which it is implemented. The femur has the ability to distribute the stresses along its geometry directing the load to the sides of the femur, which is part of the exoskeleton.

Introducción

A lo largo de la historia, la humanidad se ha encontrado con una innumerable cantidad de obstáculos, dentro del desarrollo urbano, tecnológico, social y cultural, que se han superado para poder sobrevivir, producir y mantener una vida mucho más confortable. Cabe destacar que toda tecnología implementada que innove, ya sea en un ambiente meramente industrial, social o cultural, es con el fin de que las personas se sientan más cómodas y puedan crear su vida alrededor de estas comodidades que se han ido creando y que han evolucionado, y con el tiempo perfeccionándose hasta tener dispositivos, motores, mecanismos, bastante complejos que nos ayudan a sobrevivir y a vivir nuestra vida diaria.

Una desventaja que tiene el ser humano es que necesita adaptar su entorno para poder subsistir, esto contribuye el tener el ambiente climatizado controlado donde no exista exceso de calor o de frío, crear carreteras para poder transportarse de un lugar a otro, y muchos otros efectos que tienen que ser modificados para poder subsistir, esto se puede mejorar analizando la naturaleza y como es que resuelve conflictos parecidos, por ejemplo utilización de sistemas de acondicionamiento por medio del sol, o medios de transporte por medio de mecanismo de cuatro barras para la transportación en terrenos irregulares, etc.

Mucha de esta tecnología ha sido basada en la naturaleza, esto es evidenciado desde los primeros registros del humano en la tierra, ya que el estudio de la naturaleza y el implemento de esta como una innovación (biomimética) es una ciencia que hoy en día nos ha ayudado bastante y se encuentra presente en todo, por ejemplo en aviones como lo es el vuelo de los pájaros, en trenes con un diseño en la punta del tren que se parece a la de un pájaro para aumentar la velocidad, en vestimenta subacuática copiada de la piel de la ballenas, los robots que son copiados de la estructura de las arañas, estructuras o edificios que son inspirados directamente de montañas o de piedras totalmente naturales, etc. La naturaleza tiene mucho que ofrecernos es cuestión de ver cómo es que se resuelven algún problema que se presente en nuestro entorno y similar lo que sucede de la misma naturaleza, para darle solución.

Esta ciencia se da a conocer, como tal, a finales del siglo XX en la cual se descubrió que esto se llevaba haciendo desde hace mucho tiempo desde los cavernícolas cubriendo su piel como los osos ,utilizando flechas como garras, refugiándose en cuevas como diferentes animales, esto con el fin de poder sobrevivir, las condiciones ambientales.

Se han diseñado mecanismo basados en simetrías encontradas en diferentes insectos, un ejemplo claro de esto son los exoesqueletos, que en los últimos años se ha tornado un interés

mucho mayor en este tipo de mecanismos, ya que su aplicación es muy amplia, desde su uso para cargar cosas pesadas que son imposibles o muy complicadas para una persona común, como su aplicación en el área militar aumentando resistencia, capacidad de movilidad y evitando menos fatiga en los usuarios, hasta el área medicinal que consta como rehabilitación para personas con capacidades motoras dañadas o nulas. Los exoesqueletos en si es la estructura exterior externa de los insectos, que en el caso de los seres humanos son los huesos pero la diferencia es que estos se encuentran internamente, esto ayuda a mantener todas las partes de estos insectos en su lugar. Esta estructura, los exoesqueletos, son una parte vital dentro, de cada configuración que tienen las diferentes especies de insectos, ya que esta estructura es la que recibe el impacto del exterior y los esfuerzos internos que soporta esta.

Un insecto que tiene una configuración muy específica sobre un exoesqueleto es el grillo *Calliptamus barbarus* saltador, que puede realizar grandes saltos, por este motivo, se cree que la configuración que tiene su fémur puede soportar grandes esfuerzos y, por lo cual, puede recibir grandes impactos y esto desviarlos hacia el exoesqueleto.

Por medio de esta investigación se comprendió el comportamiento que tiene el fémur del *Calliptamus barbarus* y de esta manera se realizó el estudio y el análisis de la aplicación a un exoesqueleto, de tal forma, que se pueda cambiar su forma sin disminuir su eficiencia y también darle mayores aplicaciones en diferentes problemas que necesiten de la distribución de grandes esfuerzos e implementar la configuración propuesta. Esta tecnología, basada en el estudio de la naturaleza, nos proporcionó una estrategia viable y eficiente a la resolución de nuevos problemas implementando formas geométricas que se encuentran presente, en este caso, en este particular insecto.

El estudio detallado que se realizó en el fémur del grillo fue posible gracias a la siguiente metodología: metrología, modelado 3D y manufactura. La implementación de la tecnología actual, aunque es muy novedosa, se sabe que no ha logrado su máximo resplandor, por lo cual se espera que en un futuro se pueda tener mucho más conocimiento hacia este tipo de aplicaciones, problemas que se nos presentaran en un futuro y que hoy en día no tenemos ni idea de su existencia.

Objetivo general

Implementar la estructura básica del fémur de un insecto *Calliptamus barbarus*, a través del análisis de su geometría dimensional, para comprender la resistencia que tiene, basada en forma con tipo de flecha con el que este espécimen cuenta y la geometría exterior del fémur de dicho insecto, con el fin de comprenderlo e implementarlo en exoesqueletos para humanos.

Objetivos particulares

- Entender la biomecánica del fémur del insecto *Calliptamus barbarus*.
- Dimensionar el fémur del insecto *Calliptamus barbarus*.
- Modelar en 3D el fémur del insecto *Calliptamus barbarus*.
- Fabricar elementos mecánicos mediante la aplicación de materiales compuestos.

Justificación

El estudio realizado se hace con la finalidad de crear órtesis con una estructura innovadora, aplicándolo en exoesqueletos, mejorando el soporte del mecanismo, dando más resistencia y agilidad en los movimientos, teniendo como resultado mecanismos muchos más duraderos y sin necesidad de someterse a procesos muy complejos. El propósito de este trabajo es estudiar los mecanismos bajo los que operan los movimientos del grillo con el fin de documentar, bosquejar y analizar, tanto la estructura como la geometría para poder comparar con los movimientos biomecánicos humanos, y de ser posible diseñar y proponer prototipos de exoesqueletos que sirven como apoyo para los movimientos musculares y rehabilitación, teniendo en cuenta que sea duraderos, resistentes y que cuente con mayores grados de libertad.

Capítulo 1

Estado del arte

Capítulo 1 Estado del arte

En este capítulo se describirán los aspectos generales y los principales conceptos que se necesitaron para el desarrollo del estudio del fémur del insecto *Calliptamus barbarus*. Se hará énfasis sobre las diferentes adaptaciones que se han hecho a partir de la biomimética y la aplicación que tienen el estudio de la naturaleza y de la ingeniería mecánica, como la implementación de estructuras o diseño de mecanismos, basados en el estudio del insecto, en la tecnología actual. También se presentarán los objetivos y el porqué de este estudio.

1.1. Generalidades

La biomimética o biomímesis (de *bio*, vida y *mimesis*, imitar) es la ciencia que estudia la naturaleza como fuente de inspiración para el desarrollo de nuevas tecnologías. Biomimética es el término más utilizado en literatura científica e ingeniería para hacer referencia al proceso de entender y aplicar a problemas humanos, soluciones procedentes de la naturaleza en forma de principios biológicos, biomateriales, o de cualquier otra índole. Este método, tiene como objetivo mejorar la calidad de vida de la humanidad. Además se basa en la sustentabilidad socio-económicas; mediante el fundamento que la naturaleza es el único modelo que perdura por millones de años. La naturaleza y el universo le llevan al ser humano millones de años de ventaja en cualquier campo; es por ello que es más ventajoso copiarlos, que intentar superarlos; ya que evolutivamente hablando estas soluciones nos ha mostrado su efectividad [1].

La biomimética se presenta como una disciplina que adopta el uso práctico de mecanismos, funciones, formas y procesos que estudian las ciencias biológicas, para la aplicación en diversas especialidades, entre ellas el diseño mecánico [2]. Uno de sus principales objetivos es fusionar de manera efectiva el concepto de sustentabilidad dentro de la tecnología, con esa clara base biológica y ecológica, promulgando que las leyes y los elementos de la naturaleza son capaces de enseñarnos el camino hacia una evolución en los paradigmas del diseño, asumiendo una perspectiva holística al tratar de emular formas, procesos o estrategias, logrando así una verdadera simbiosis al proyectar productos, mensajes o ambientes acordes con los seres vivos, sus interacciones y su biodiversidad [3,4].

También ha logrado generar una serie de mecanismos fisicoquímicos increíblemente especializados para lograr que las pieles que cubren a los animales y a las plantas puedan permitir a cada especie su supervivencia. Un ejemplo de cómo se aplica el estudio de la naturaleza a las tecnologías actuales, es la cabeza tractora de ciertos trenes de alta velocidad

cuya forma es aerodinámica procedente de la forma de la cabeza del pico del Martín Pescador (figura 1.1).



Fig.1.1. Tren bala japonés Shinkansen mejorado con la aplicación de la forma del pico del Martín Pescador. [5]

El estudio continuo de las nuevas tecnologías es muy útil para mejorar prototipos o proyectos ya existentes, dándole una solución a diferentes problemas que se presentan en la evaluación de proyectos e innovando o mejorando maquinas, sistemas y estructuras basando en el estudio en mecanismos similares presentes en la naturaleza.

1.2. Biomimética

A lo largo de los años ésta ciencia ha contribuido enormemente a la adaptación de la humanidad a la misma supervivencia diaria. Esta ciencia, incluso antes de que se le diera un nombre, ya tenía presencia en la forma de vida del ser humano primitivo. El término biomimética, que fue acuñado por Otto H Schmitt [6], representa los estudios y la imitación de los métodos, mecanismos y procesos de la naturaleza. Las capacidades de la naturaleza son muy superiores en diversas áreas a las capacidades humanas, la adaptación de muchos de sus rasgos y características tienden significativamente a mejorar la tecnología [3,4].

La biomimética también se presenta como una disciplina que adopta el uso práctico de mecanismos, funciones, formas y procesos que estudian las ciencias biológicas, para la aplicación en diversas ramas, como el diseño industrial o el diseño mecánico. Es una ciencia dedicada a imitar el funcionamiento de los seres vivos a través de ingeniería mecánica o robótica,

aplicando diseños naturales para resolver problemas de ingeniería, ciencia de materiales, medicina y otros campos.

La biomimética es un método por medio del cual los diseñadores e ingenieros hacen investigaciones biológicas con el propósito de determinar cómo los organismos resuelven problemas complejos [3, 7, 8]. En otras palabras el enfocarnos en como la naturaleza actúa es la solución a muchos de los problemas a los que nos enfrentamos actualmente, y con el simple hecho de observar y analizar las diferentes situaciones se puede plantear una solución que se encuentra tanto en plantas, como en animales e incluso en microorganismos.

Un medio de transporte que se implementó para poder recorrer caminos sin necesidad de ser tratados, como las carreteras hoy en día, sustituir las ruedas por mecanismos, que simulan el movimiento de las patas de un escarabajo, y contar con la capacidad de este insecto para moverse en terrenos irregulares, todo este estudio basado en el estudio del comportamiento del escarabajo (figura 1.2).



Fig.1.2. Simulador biomimético de locomoción animal terrestre [9].

La tecnología actualmente se está enfocando en la evolución que han tenido miles de especies y esto nos ha dado resultados mucho más eficientes y a la vez simples. En los últimos años, ese tipo de pensamiento aplicado en un contexto comercial ha producido una gran cantidad de nuevos productos, tales como pegamentos no tóxicos, medios de transporte, empleando conceptos aerodinámicos, estructuras resistentes y ligeras, sensores, redes neuronales, etc.

1.2.1. Aplicación de la biomimética en la mecánica.

La biomimética, como se mencionó anteriormente, es una ciencia que tiene muchas aplicaciones en las cuales su principal objetivo es el estudio de la naturaleza en sí, y darle

soluciones a diferentes problemas que se presentan día a día en nuestro entorno, copiando una posible solución a diferentes partes, por ejemplo; el vuelo de las aves, el nado de los peces, la estructura de insectos, por mencionar algunos sistemas.

Una de las aplicaciones más importantes que tiene la biomimética es la biomecánica. Podemos definir la biomecánica como el estudio de sistemas biológicos (animales, órganos, plantas, células y bacterias), desde un punto de vista mecánico. Sobre el origen de esta disciplina, podríamos considerar que las primeras herramientas biomecánicas de la humanidad pudieron haber sido el bastón y las muletas. Para su manufactura, sólo pudo haber bastado conocer la estatura y corpulencia del usuario y la elección del material: madera o algún carrizo lo suficientemente resistente.

1.2.2. Origen de la biomecánica

La elaboración de prótesis humanas se remonta al antiguo Egipto. Hace algunos años, la investigadora Jacky Finch (del Centro de Egiptología Biomédica, Universidad de Manchester, RU) analizó dos prótesis de dedo gordo del pie, o primer dedo, de una antigüedad anterior a los 600 años a. C. Una fue elaborada de lino, pegamento y yeso, y la otra (encontrada en el pie de una momia de mujer), se construyó de cuero y madera. La científica encontró que además de una función estética, estas prótesis ayudaron a estabilizar la marcha de sus portadores [10]. La primera prótesis realizada por los egipcios, con el cual se pretendía sustituir el dedo del pie, con el cual se generaba mayor estabilidad en la persona que lo usaba (figura 1.3).



Fig.1.3 Prótesis egipcia de dedo del pie [11].

En la literatura se describen la manipulación de prótesis rudimentarias de madera e incluso bronce para personas que habían perdido un brazo o una pierna, las cuales se elaboraron en base a la capacidad del material para soportar el peso corporal o minimizar el desgaste. Aunque en forma muy elemental y cualitativa, la biomecánica siguió desarrollándose lentamente. En

tiempos del Renacimiento, Leonardo da Vinci diseñó dispositivos mecánicos para volar (inspirado en las alas de las aves) e incluso un robot antropomorfo (figura 1.4).



Fig. 1.4 Robot diseñado por Leonardo da Vinci. [13]

Años después, Andrés Vesalio publicó sus insuperables ilustraciones de anatomía (Sobre la estructura del cuerpo humano, en 1543), las cuales serían de gran utilidad para posteriores estudios biofísicos [12]. A partir de este periodo el análisis de fuerzas, tensiones y esfuerzos en el diseño de dispositivos biomecánicos con respecto a su forma y materiales constituyentes, la biomecánica comenzó a ganar importancia.

En la segunda mitad del siglo XX la biomecánica comenzó a ser cultivada como disciplina independiente. Gracias a los avances tecnológicos, el sistema circulatorio y el microcirculatorio, red de minúsculos vasos sanguíneos, pudieron estudiarse en función de la cantidad y morfología de las células constituyentes del plasma sanguíneo. Se analizó y modeló el intercambio gaseoso en los alvéolos pulmonares al igual que las propiedades plásticas de las membranas celulares. Mediante estos modelos, se logró predecir, con una certidumbre elevada, la dinámica real del sistema circulatorio, así como el comportamiento de enfermedades como la diabetes, el enfisema pulmonar, y algunas cardiopatías. De los científicos que estudiaron estos sistemas biológicos, destaca en forma significativa el profesor chino-estadounidense Yuan-Cheng Fung (nacido en 1919), quien es considerado el padre de la biomecánica moderna [14].

1.2.3. Otras aplicaciones de la biomecánica

El estudio biomecánico de hongos, plantas y árboles ha permitido hacer una correlación entre su morfología y el medio ambiente donde se desarrollan. De particular interés ha sido la génesis de filamentos en los hongos filamentosos, así como la de las ramas y hojas de plantas y árboles. Por otra parte, el estudio del ascenso de agua de las raíces a las hojas, filamentos, o frutos, mediante el fenómeno de capilaridad, se ha analizado con el propósito de mejorar la absorción de nutrientes del suelo. La biomecánica da soporte a otra disciplina científica conocida como farmacodinamia, la cual se encarga de estudiar la difusión y efectos de los fármacos en el organismo. En la actualidad, se realiza investigación para hacer más eficiente la distribución general de fármacos que pudieran permitir un ataque selectivo a tumores cancerosos, por decir un ejemplo.

Incluso en el deporte, la biomecánica ha sido importante para mejorar el rendimiento de los atletas, desarrollar técnicas de entrenamiento, y diseñar equipamiento de alto rendimiento (tenis apropiados para un deporte particular, cascos aerodinámicos para ciclistas, trajes para natación, bicicletas especiales, entre otros). Además, para los estudios del efecto de la ingravidez en los organismos biológicos (al permanecer un largo periodo en órbita), la biomecánica ha tenido un papel importante.

El movimiento de los insectos puede inspirar el desarrollo de extremidades protésicas. Neurobiólogos de la Universidad de Leicester, en Reino Unido, han demostrado que las extremidades de los insectos pueden proporcionar a los ingenieros nuevas formas para mejorar el control de las extremidades robóticas y las prótesis. Los insectos controlan sus movimientos mediante una estrecha interacción de control neuronal y biomecánico [15].

Investigaciones recientes muestran que la estructura de algunas articulaciones de las patas de los insectos hace que estas se muevan. Las llamadas "fuerzas conjuntas pasivas" sirven para devolver la extremidad hacia una posición de descanso. Los movimientos pasivos difieren en los miembros que tienen diferentes funciones y comportamiento de musculatura, lo que sugiere que las estructuras de la articulación están adaptadas específicamente para complementar las fuerzas musculares. Cuando un animal mueve una extremidad, hay una amplia gama de fuerzas involucradas. Los movimientos pueden ser generados por fuerzas activas de contracción muscular, retrocesos pasivos de los músculos que no están activadas, retrocesos pasivos de los tendones, las fuerzas gravitacionales, viscosidad, e incluso retrocesos explosivos de doblado de los elementos esqueléticos [16-19].

Los investigadores proponen un esquema de control del motor de las articulaciones de insectos. Algunos animales almacenan energía en tendones de los músculos y otras estructuras elásticas. Dicho almacenamiento de energía permite que las fuerzas explosivas que deben aplicarse para generar movimientos son mucho más rápidas que las que pueden ser generadas por contracciones musculares solas. Esto es crucial, por ejemplo, cuando los saltamontes o las pulgas saltan [20]. El saltamontes *Gregaria schistocerca* (figura 1.5), tiene la capacidad de realizar saltos con una amplitud muy grande, en relación a las dimensiones del insecto.



Fig. 1.5. Langosta *Gregaria schistocerca* que muestran grandes patas traseras especializadas para saltar [20].

La configuración del insecto *Langosta gregaria* es muy parecida a la especie *Calliptamus barbarus* en el cual está basado este estudio, Mientras que el insecto *Pseudoprosopopia scabra* (figura 1.6), es realizado un estudio similar sobre sus extremidades, pero este cuenta con diferente configuración de su exoesqueleto.



Fig. 1.6. Insecto falso palillo *Pseudoprosopopia scabra* mostrando lo delgado de sus patas. [20].

Este estudio proporciona una nueva comprensión de las formas en que los mecanismos de almacenamiento de energía pueden funcionar en una gama mucho más amplia de los movimientos, el trabajo se centró en identificar cómo las propiedades biomecánicas de los miembros de una amplia gama de insectos influyen en los movimientos relativamente lentos, como los que se producen durante la marcha, el rasguño o la escalada [21].

El resultado fue que, aunque algunos movimientos se ven influidos por las propiedades de los músculos y tendones, otros se generan por las fuerzas que se presentan dentro de las propias articulaciones [21]. En la pata trasera de langostas, especializada en saltos y patadas, el músculo extensor es mucho más grande y más fuerte que el músculo flexor antagonista, lo que le permite dar poderosas patadas y saltos propulsados por extensiones de la tibia, que son dirigidos por las contracciones del músculo extensor. Cuando las langostas se preparan para saltar, grandes cantidades de energía generada por el músculo extensor se almacenan en el tendón del músculo y en el exoesqueleto duro de la pierna. Las articulaciones de las piernas de insectos proporcionan una oportunidad de estudiar el control de movimiento porque cada articulación de la pierna es directamente controlada por sólo dos músculos, modelado simplificar y análisis (Figura 1.7) [22].

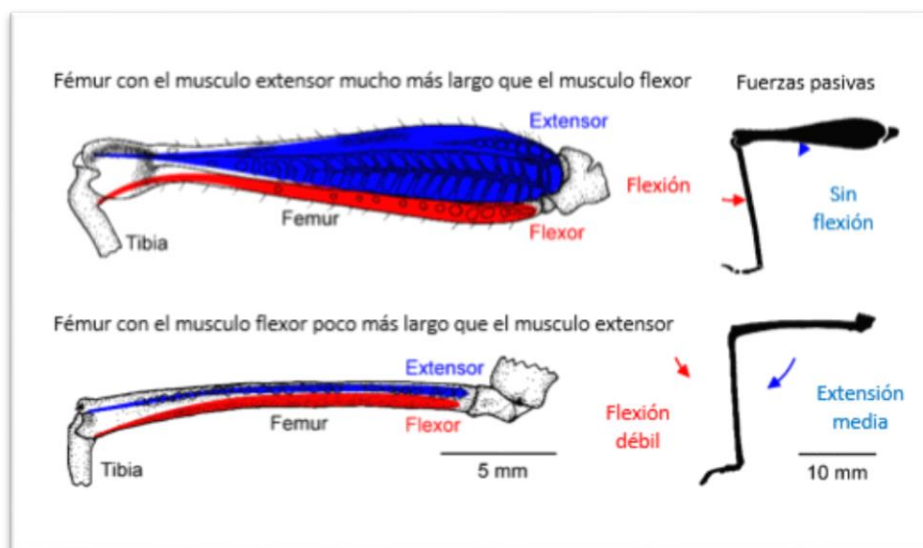


Fig. 1.7. Grafica de músculos y fuerzas pasivas [20].

Las fuerzas conjuntas son muy importantes, sin embargo, carecían de correlaciones neurales, y hasta ahora habían sido "invisibles" a la neurofisiológica previa en otras investigaciones [22,23]. En la mayor parte del fémur, donde no se espera esfuerzo alguno, habían descubierto un nuevo tipo de fuerza pasiva, un "silencioso compañero" que debe ser considerado cuando se analiza el control de movimiento. En un sentido más amplio, tenían demostrado que, por ejemplo, la combinación de la biomecánica con neurobiología puede rendir la investigación hecha [24].

Gracias a estas investigaciones realizadas se encontraron fuerzas conjuntas pasivas que realmente contrarrestan la fuerza del músculo extensor de los animales. En el saltamontes cabeza de caballo (figura 1.6), por ejemplo las fuerzas conjuntas pasivas incluso difieren entre las patas del medio y las patas traseras, incluso en el mismo animal. En ambos pares de patas, las fuerzas conjuntas pasivas soportan el músculo más débil. Esto podría ser muy importante para la generación de los movimientos en los insectos debido a que las fuerzas pasivas permiten una transferencia de energía a partir del músculo más fuerte al más débil. Utilizando fuerzas pasivas balanceadas puede proporcionar a los ingenieros nuevas formas de mejorar el control de las extremidades robóticas y de prótesis.

1.3. *Calliptamus barbarus*

Calliptamus es un género de insectos ortópteros caelíferos perteneciente a la familia Acrididae. Es originario de Europa, África y Asia. *Calliptamus barbarus*, especie a la cual se le asigna el nombre de saltamontes o langosta de alas rojas, es una langosta de tamaño mediano, de unos 2,5 cm de longitud que se encuentra abundantemente en prados, matorrales y zonas arbustivas desde finales de verano hasta entrado el otoño. En la comarca de Bages, si el verano ha resultado favorable, *Calliptamus barbarus* es la especie de langosta más propensa a ocasionar explosiones demográficas, rememorando los relatos bíblicos y acercándose a las imágenes de las temidas plagas de langostas del norte de África. El abdomen es corto, con las alas igualmente cortas que apenas llegan a cubrirlo por completo. Las alas posteriores tienen un matiz de color rojizo, visible solo cuando las abre. También son características de *Calliptamus barbarus* (figura 1.8) sus patas posteriores con fémures con dos franjas oscuras y tibias con la cara interior del mismo color rojizo que las alas [25].



Fig. 1.8. Insecto *Calliptamus Barbarus* [26].

Existen alrededor de 13,000 de especies descritas a nivel mundial, la mayoría tropicales, pero distribuidas por todo el planeta. En Norteamérica se encuentran 1800 especies mientras que en México existen aproximadamente 920 especies pertenecientes a 274 géneros [27]. El insecto en el cual se basará este estudio, y del cual se toma la idea de implementar estructuras y usarlo en exoesqueletos es el, ya antes mencionado, *Calliptamus barbarus*.

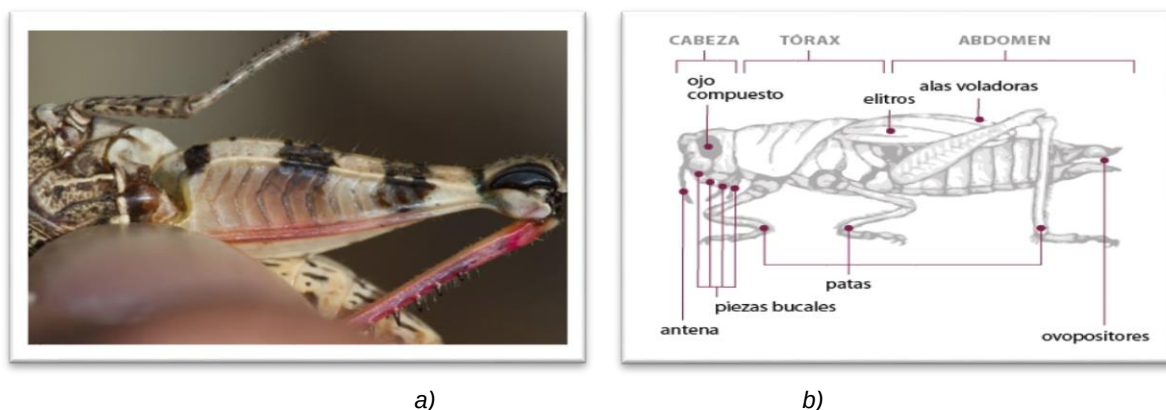


Fig. 1.9. Fémur y partes del grillo. a) Fémur del insecto a detalle [28] y b) Partes o exoesqueleto de un grillo. [29]

Este insecto tiene la capacidad de dar grandes saltos y de resistir grandes impactos por esto se tiene un gran interés en saber cómo es la función de la estructura de su propio exoesqueleto, y que esto nos ayude a comprender como es que se puede aplicar esto en la rehabilitación y en el uso de mecanismos. El fémur del insecto (figura 1.9) cuenta con pequeñas secciones que se encuentran en él en forma de flecha (figura 1.9 a) y las partes de todos los elementos que comprende la estructura de este insecto (figura 1.9 b).

1.4. Exoesqueletos

Como ya se mencionó los sistemas mecánicos de animales e insectos son accionados por sistemas, hidráulicos, muscular y estructurales, como lo es el exoesqueleto el cual es un almacén ergonómico que permite al usuario realizar actividades cotidianas donde usa una parte de su energía metabólica para generar movimientos, que por medio de un acoplamiento a sus extremidades la fuerza se potencializa; entonces el usuario solo tiende a utilizar un mínimo o nada de energía metabólica para moverse; es decir el exoesqueleto tiende a responder con fuerza proporcional a la que se le pida. Por lo tanto también se puede decir que un exoesqueleto es un dispositivo que aumenta el desempeño humano, controlado por dispositivos y máquinas que pueden incrementar velocidad, fuerza y resistencia el operador [30]. Los exoesqueletos existen en la naturaleza, en diferentes tipos de configuraciones, donde la amplificación de potencia y soporte del cuerpo, son las principales funciones de los exoesqueletos, animales. De acuerdo

con este principio se han hecho investigaciones robóticas alrededor del mundo, trayendo ventajas que se pueden aprovechar de este tipo de sistemas [31].

Un insecto que tiene una configuración muy específica sobre un exoesqueleto es el grillo *Calliptamus barbarus*, que es capaz de realizar grandes saltos ya que, se cree, que por la configuración que tiene su fémur puede soportar grandes esfuerzos y por lo cual puede recibir grandes impactos y esto desviarlos hacia el exoesqueleto, como se mencionó anteriormente. Los exoesqueletos tienen el objetivo de maximizar las habilidades físicas del ser humano, dotándolo de una gran fuerza, capaz de levantar hasta 10 veces su peso. Pero el concepto de los exoesqueletos viene desarrollándose desde hace más de 30 años, en sus inicios fueron diseñados para uso industrial y con el pasar del tiempo fueron evolucionando hasta llegar a lo conocemos actualmente. A pesar de que muchos de estos trajes robóticos son diseñados para uso militar, también existen empresas dedicadas a la fabricación de exoesqueletos aplicados a la rehabilitación.

El desarrollo de exoesqueletos no es algo novedoso, desde hace décadas se han realizado numerosos diseños y prototipos. Entre 1960 y 1970, la Universidad de Belgrado desarrolló los primeros modelos, destinados a dar movilidad a pacientes parapléjicos. El exoesqueleto HAL, es una de la propuesta más actualizada desarrollada por el profesor Sankai de la Universidad de Tsukuba en Japón. ReWalk, es un exoesqueleto desarrollado en Israel por la empresa Argo Medical Technologies destinado para parapléjicos, Lokomat y LOPES, son plataformas estáticas de terapia para pacientes con lesión medular [32-34]. Un exoesqueleto sostiene al cuerpo de forma externa (figura 1.10).



Fig. 1.10. Exoesqueleto moderno para rehabilitación. [35]

Los exoesqueletos se desarrollan para hacer posible que las personas con limitaciones de movimiento puedan andar, lo que incrementa su fuerza y su resistencia. El fin de esto es que personas con discapacidad puedan volver a ponerse en pie, caminar, mantenerse de pie, girarse y sentarse por sí mismos.

También es posible realizar sin problemas movimientos laterales, subir escaleras y caminar sobre superficies duras y planas, incluyendo pendientes ascendentes y descendentes. Si bien es cierto que las piernas biónicas no pueden sustituir completamente a la silla de ruedas, también es verdad que sus usuarios vuelven a ser capaces, por ejemplo, de llevar a cabo su trabajo de pie. Actualmente nuevos campos emergentes de la ciencia, como la nanotecnología e ingeniería molecular, han usado métodos de síntesis novedosos intentando imitar la síntesis de auto ensamblaje y con altos rendimientos que la naturaleza ha desarrollado durante millones de años y con esto perfeccionado. Un exoesqueleto consiste en una estructura mecánica externa acoplada a la persona cuyas articulaciones y eslabones corresponden con las articulaciones del cuerpo humano [32,37]. Un avance tecnológico muy importante se ha observado en la evolución de silla de ruedas al uso de estos mecanismos muchos más avanzados (figura 1.11).



Fig. 1.11. Rehabilitación por medio del uso de exoesqueletos [36].

Teniendo en cuenta la evolución que ha tenido la industria médica en conjunto con la tecnología y distintos mecanismos utilizados, y su constante crecimiento, se mejorará la rehabilitación y la calidad de vida de las personas que dispongan de uno.

1.4.1. Biomimética y exoesqueletos

Se han diseñado mecanismos basados en simetrías encontradas en diferentes insectos, un ejemplo claro de esto son los exoesqueletos, que en los últimos años se ha tornado un interés mucho mayor en este tipo de mecanismos, ya que su aplicación es muy amplia, desde su uso para cargar cosas pesadas que son imposibles o muy complicadas para una persona común, como su aplicación en el área militar aumentando resistencia, capacidad de movilidad y evitando

la fatiga en los usuarios, hasta el área medicinal que consta como rehabilitación para personas con capacidades motoras dañadas o nulas. Los exoesqueletos en si son la estructura externa de los insectos, que en el caso de los seres humanos son los huesos pero la diferencia es que estos se encuentran internamente, esto ayuda a mantener todas las partes de los insectos en su lugar. Esta estructura es una parte vital dentro de cada configuración que tienen las diferentes especies de insectos, ya que esta estructura es la que recibe el impacto del exterior y los esfuerzos internos que soporta la misma.

El exoesqueleto en la naturaleza es el esqueleto externo continuo que cubre toda la superficie de animales arácnidos, insectos, crustáceos y otros grupos relacionados, donde cumple una función protectora, de respiración y de mecánica, proporcionando el sostén necesario para la eficiencia del sistema muscular, (figura 1.12a y 1.12b).

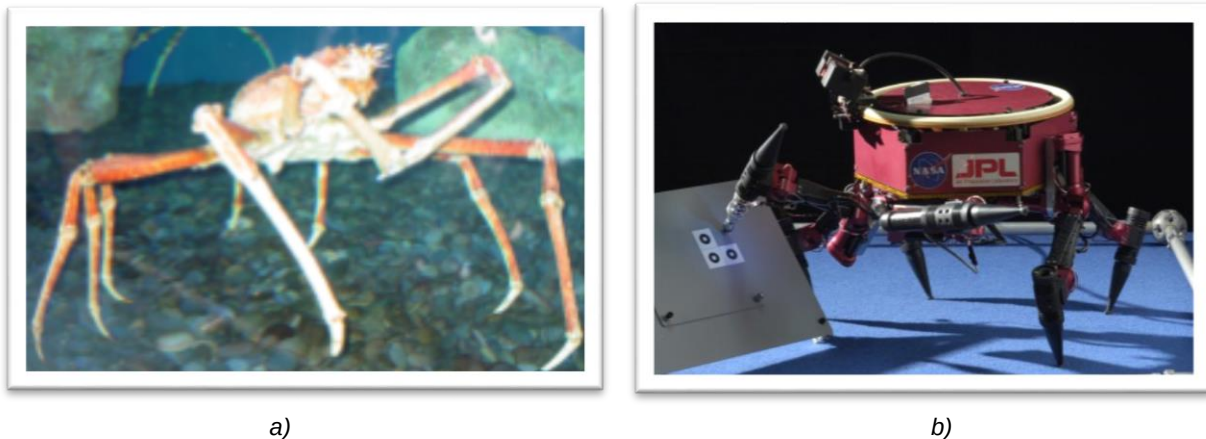


Fig. 1.12. El robot de seis patas [LEMUR (Limbed Excursión móvil Utilidad Robot), que se desarrolla en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (Brett Kennedy, JPL) [39], (a) el cangrejo de ocho patas en un acuario. (b) LEMUR puede utilizar una variedad de herramientas para llevar a cabo operaciones de montaje [38].

Este robot en particular puede realizar ensambles ya que cuenta con un repertorio de herramientas que facilitan este tipo de trabajo en condiciones inaccesibles para los humanos, como lo es el espacio o profundidades muy extremas dentro del mar. El LEMUR, es un robot que tiene la habilidad de poder reparar objetos dañados en condiciones que no son muy peligrosas para el ser humano, con una gran variedad de herramientas a su disposición (figura 1.12b) [38].

Como se pudo comprender, a lo largo de este capítulo, la biomímesis tiene un gran impacto actualmente en la tecnología y en nuestra vida diaria, ya sea como un atajo, una innovación o una nueva forma de poder implementar una solución que la naturaleza a un problema aplicado, tal es el caso de los exoesqueletos y robots, que son diseñados en base a exoesqueletos animales, el cual es basado en la estructura y forma del animal, crustáceo o insecto. Comprender como la naturaleza actúa para crear sistemas, estructuras y el funcionamiento de mecanismos

más complejos es esencial para un avance tecnológico mayor, ya que la mayoría de las soluciones que propone la misma naturaleza, a veces, es mucho más fácil que la solución que se le está dando actualmente a dicho problema.

Dentro del estudio se revisó la información relacionada a la biomimética de la naturaleza del grillo *Calliptamus barbarus* para poder aplicarlo en exoesqueletos para humanos. La geometría dimensional con la que cuenta el fémur del insecto *Calliptamus barbarus* es interesante, ya que aun sin contar con músculos de apoyo, el grillo puede realizar grandes saltos, al igual que soportar el impacto del mismo, esta habilidad nos deja como cuestionamiento ¿Será la estructura geométrica del exoesqueleto lo que le da esta habilidad al insecto o habrá algo más que influya en el comportamiento? ¿La geometría del fémur permite distribuir mejor la carga aplicada en él? ¿Esta estructura será factible para aplicarla en mecanismo de exoesqueletos?

Bibliografía Capítulo 1

- [1] Goldman, D. (2012). *Introducción a Biomímesis- La tecnología como mímico de la naturaleza*. En: Modelos, estrategia y más, psi – pensamiento innovador.
- [2] Vincent, J. (2007). *Biomimetics: Strategies for Product Design Inspired by Nature - A Mission to the Netherlands and Germany*. Report of A DTI Global Watch Mission. Reino Unido: Editorial Pera.
- [3] Bar-Cohen, Y. (2005). *Biomimetics—Biologically Inspired Technologies*. Estados Unidos: Editorial CRC Tylor & Francis
- [4] Vincent, J. F. (2001). Stealing ideas from nature. En: S. Pellegrino. (ed.) *Deployable Structures* (pp 51–80). Vienna, Australia: Springer-Verlag Wien GmbH.
- [5] Benyus, J. M. (2002). *Biomimicry. Innovation Inspired by Nature*. Nueva York, Estados Unidos: Editorial Perennial.
- [6] Schmitt, O. H. (1969). Some interesting and useful biomimetic transforms. En: Boston, Massachusetts (ed.), Third International Biophysics Congress of the International Union for Pure and Applied Biophysics (pp 297). Cambridge, Mass.
- [7] Chiras, D. (1992). *Lessons from nature: learning to live sustainably on the earth*. Estados Unidos: Island Press,
- [8] Bar Cohen, Y. (2006), Biomimetics-using nature to inspire human innovation. En: *Bioinspiration & Biomimetics*, 1, pp 1–552.
- [9] Uribe M. (2012). *Diseño de Pierna Articulada para el Planteamiento de Medios Alternativos de Transporte*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- [10] J. Finch. (2011). The ancient origins of prosthetic medicine. En: *The Lancet*, 377, pp. 548-549.
- [11] WebUrbanist. (2009). *La Evolución de las Prótesis*. Consultado el 24 de Enero del 2016. Disponible en: <http://ksawa.es/2009/12/la-evolución-de-las-prótesis>
- [12] Castiglioni, A., (1943) *Andreas Vesalius: Professor at the Medical School of Padua*. Bull. Nueva York, Estados Unidos. pp 766-777.

- [13] NEOTEO. (2007). *El Robot de Leonardo Da Vinci*. Consultado el 24 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.neoteo.com/el-robot-de-leonardo-da-vinci/>
- [14] Kassab, Y. C. (2004). "Bert" Fung: The Father of Modern Biomechanics. En: *Mechanics & Chemistry of biosystems (MCB)*, 1, pp. 5-22.
- [15] Sutton, G. P., (2013) Animal Biomechanics: A New Silent Partner in the Control of Motion. En: *Current Biology*, 15 (23).
- [16] Zajac, F.E. (1989). *Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control*. En: *Revista Biomedica en Ingles*, 17, pp. 359–411.
- [17] Patek, S.N., Dudek, D.M., y Rosario, M. V. (2011). *From bouncy legs to poisoned arrows: elastic movements in invertebrates*. En: *J. Exp. Biol.* 214, pp 1973–1980.
- [18] Gronenberg, W. (1996). *Fast actions in small animals: spring and click mechanisms*. En: *J. Comp. Physiol. A*. 178, pp 727–734.
- [19] Hooper, S.L., Guschlbauer, C., Blumel, M., et al.. (2009). *Neural control of unloaded leg posture and of leg swing in stick insect, cockroach, and mouse differs from that in larger animals*. En: *J. Neurosci.* 29, pp. 4109–4119.
- [20] Ache, J.M., y Matheson, T. (2013). Passive joint forces are tuned to limb use in insects and drive movements without motor activity. En: *Curr. Biol.* 23, pp. 1418–1426.
- [21] Investigación de la Universidad de Leicester. (2013). *El movimiento de los insectos sin músculos puede inspirar el desarrollo de extremidades protésicas*. Consultado el 23 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.abc.es/ciencia/20130719/abci-insectos-musculo-protesis-201307181807.html>
- [22] Page, K.L., Zakotnik, J., Dürr, V., y Matheson, T. (2008). Motor control of aimed limb movements in an insect. En: *J. Neurophysiol.* 99, pp. 484–499.
- [23] Zakotnik, J., Matheson, T., y Dürr, V. (2006). Co-contraction and passive forces facilitate load compensation of aimed limb movements. En: *J. Neurosci.* 26, pp. 4996–5007.
- [24] Nishikawa, K., Biewener, A. A., Aerts, P., Ahn, A.N., Chiel, H.J., Daley, M.A., et al. (2007). *Neuromechanics: an integrative approach for understanding motor control*.

- [25] Badia, J., Vallès, F., Adot, X, J., et. al. (1999). *El Medio Romeral del Bages, El Romeral*. Consultado el 23 de Enero del 2016. Disponible en: <http://ichn.iec.cat/Bages/brolles/lmatges%20grans/cCalliptamus%20barbarus.htm>
- [26] Ferran Turmo. (2013) *Calliptamus barbarus*. Consultado el 24 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.biodiversidadvirtual.org/insectarium/Calliptamus-barbarus-2-2-img436615.html>
- [27] J. L. Bousquets, Morrone, J. J., Yañez, O., et. al. (2004). *Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México: Hacia una síntesis de su conocimiento* (4). México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [28] Cosmin, O. (2012). *Insect around Romania and not only*. Consultado el 23 de Enero del 2015. Disponible en: http://insects.nature4stock.com/?page_id=1943
- [29] Carballa M., y Santos. J. *Insectos: Biblioteca Plan Ceibal*. Consultado el 1 de marzo del 2016. Disponible en: http://contenidos.ceibal.edu.uy/fichas_educativas/public/ciencias-naturales/actividades/033insectos.html
- [30] K,H: low, Xiaopeng Liu, Hao Yong Yu, et. al., (2004). Development of a lower extremity exoskeleton, preliminary study for dynamic walking, En: 8° International Conference on Control, automation, Robotics and Vision Kummning (pp. 2088-2093). China.
- [31] C-J, Yang, J-F Zhang, Y Chen., et al. (2008) , A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. En: Proc. IMechE 2008 (pp. 1599-1612). Hangzhou, China: Zhejiang University.
- [32] Grosso, J. M., Tibaduiza, D. (2009). Diseño Conceptual de un Exoesqueleto para Asistir la Rehabilitación de Miembro Inferior. En: Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica UNAB. Bucaramanga, Colombia: Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- [33] Dollar, A. M. (2008), *Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art*. En: *.IEEE Transactions on Robotics*, 1 (4), pp. 144-158.
- [34] Bureau, M., Eizmendi, G., Olaiz, E., et. al. (2007). Diseño de un nuevo exoesqueleto para neurorehabilitación basado en detección de intención. En: 2do Congreso Internacional de Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos. DRT4all. España: Fundación ONCE para la Cooperación e Integración Social de las Personas con Discapacidad.
- [35] Dirección General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM. (2015). *Exoesqueletos: la tecnología para volver a caminar*. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.swagger.mx/tecnologia/exoesqueletos-tecnologia-para-volver-caminar>

[36] Domínguez, N. (2014) *La ciencia en 2014: láseres, exoesqueletos y bebés con tres padres*. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://esmateria.com/2014/01/01/la-ciencia-en-2014-laseres-exoesqueletos-y-bebes-con-tres-padres/>

[37] Chavez., M. A. (2010). Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. En: *Revista Ingeniería Biomédica*, 7 (4), pp. 63-73.

[38] Kennedy, B. NASA. Jet propulsion Laboratory, California Institute of technology Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: https://www-robotics.jpl.nasa.gov/people/Brett_Kennedy/peopleImages.cfm

[39] Bar-Cohen, Y. (2007). Electroactive polymers (EAP) as an enabling tool in biomimetics, En: SPIE Proceedings. San Diego, California.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

En este capítulo se describe el método de diseño que se utilizó para esta investigación, así como la metodología y los conceptos que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de análisis dimensional del fémur del insecto.

2.1. Diseño mecánico

La metodología del diseño es utilizada para poder satisfacer una necesidad o un problema por medio de soluciones, ya sea por medio de una innovación o una idea nueva que pueda ayudar a dar solución a la problemática establecida, se tiene que tomar en cuenta que debe de ser útil y que sea posible su fabricación, sea quien sea el que lo use o lo fabrique.

Los ingenieros mecánicos poseen competencias relacionadas con la producción y procesamiento de energía con el suministro de medios de producción, las herramientas de transporte y las técnicas de automatización. Las bases de su capacidad y conocimientos son extensas. El diseño en ingeniería mecánica involucra todas las áreas que componen esta disciplina, como lo son: mecánica de materiales, de sólidos, de fluidos, transferencia de masa y momento, procesos de manufactura y las teorías de la electricidad y la información [1].

2.2. Fases de diseño

El proceso de diseño (figura 2.1), comienza con la definición de una necesidad y la decisión de resolverla, después de muchas interacciones, termina con la presentación de los planes para satisfacerla [6]. Las fases más importantes para el diseño son las siguientes:

- Reconocimiento de la necesidad
- Definición del problema
- Síntesis
- Análisis y optimización
- Evaluación
- Presentación

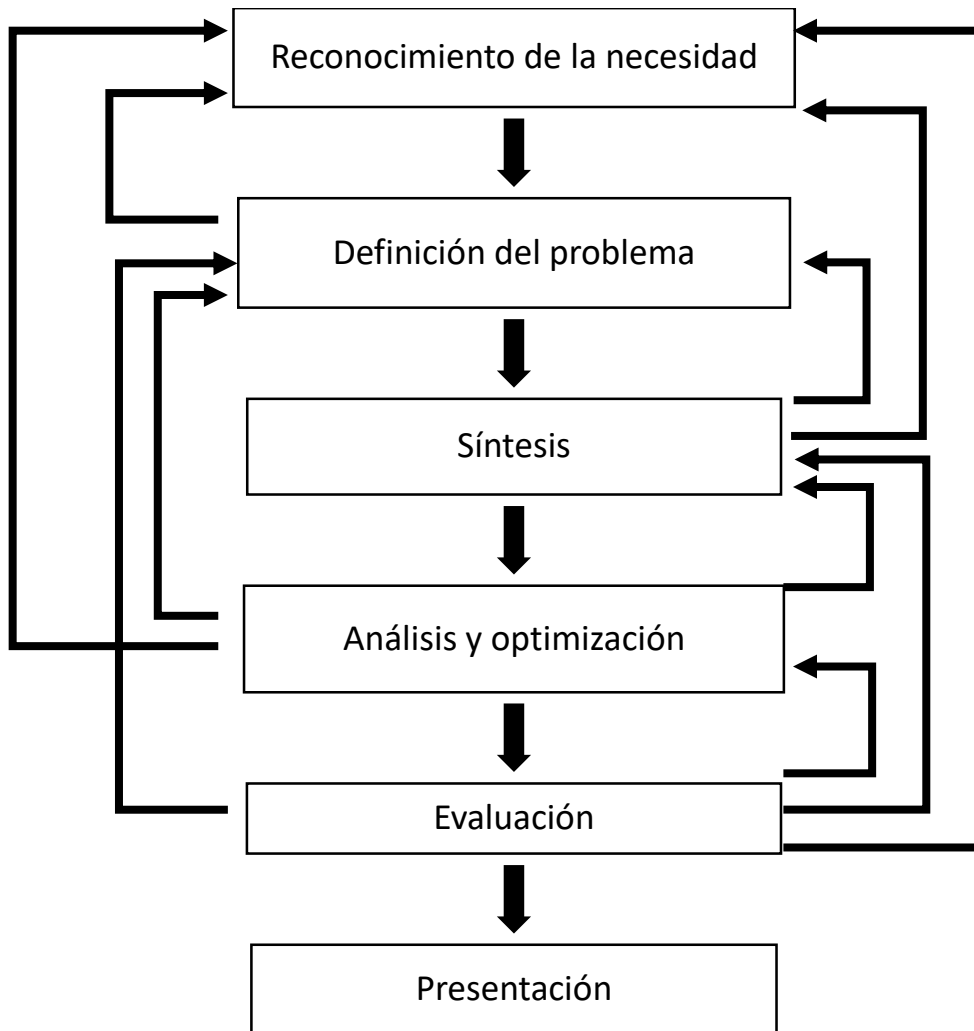


Fig. 2.1 Metodología del proceso de diseño del elemento mecánico [1].

El proceso de diseño comienza con la *identificación de una necesidad*. Con frecuencia, el reconocimiento y la expresión de ésta constituyen un acto muy creativo, porque la necesidad quizá sólo sea una vaga inconformidad, un sentimiento de inquietud o la detección de que algo no está bien. A menudo la necesidad no es del todo evidente; el reconocimiento se acciona por una circunstancia adversa particular o por un conjunto de circunstancias aleatorias que se originan casi de manera simultánea [1].

La *definición del problema* es más específica, que la identificación de una necesidad, y debe incluir todas las especificaciones del objeto que va a diseñarse. Las especificaciones son las cantidades de entrada y salida, las características y dimensiones del espacio que el objeto debe ocupar y todas las limitaciones sobre estas cantidades.

Algunas veces, a la *síntesis* de un esquema que conecta elementos posibles del sistema se le llama *invención del concepto del diseño*. Éste es el primer y más importante paso en la tarea de

la síntesis. Varios esquemas deben proponerse, investigarse y cuantificarse en términos de medidas establecidas. A medida que el desarrollo del esquema progresa, se deben realizar análisis para evaluar si el desempeño del sistema es cuando menos satisfactorio, y si lo es, qué tan bien se desempeñará. Los esquemas del sistema que no sobreviven al análisis se revisan, se mejoran o se desechan. Los que cuentan con potencial se optimizan para determinar el mejor desempeño del esquema. Los esquemas en competencia se comparan de manera que se pueda elegir el camino que conduzca al producto más competitivo [1].

Tanto el *análisis* como la *optimización* requieren que se construyan o inventen modelos abstractos del sistema que admitirá alguna forma de análisis matemático. A estos modelos se les llama modelos matemáticos. Cuando se les crea se espera que sea posible encontrar uno que simule muy bien al sistema físico real. La *evaluación* es una fase significativa del proceso de diseño total (figura 2.1). La evaluación representa la prueba final de un diseño exitoso y por lo general implica la prueba del prototipo en el laboratorio [1]. Aquí se desea construir el diseño del fémur del insecto *Calliptamus barbarus*.

La comunicación de los resultados a otros es el paso final y vital de *presentación* del proceso de diseño. Sin duda, muchos grandes diseños, invenciones y trabajos creativos se han perdido para la posteridad sólo porque sus creadores no fueron capaces o no estuvieron dispuestos a explicar sus logros a otros. La presentación es un trabajo de venta. Cuando los diseñadores venden una idea nueva, también se venden a sí mismos. Si suelen tener éxito en la venta de ideas, diseños y soluciones nuevas a la gerencia, comienzan a recibir aumentos salariales y promociones; de hecho, así es como cualquiera tiene éxito en su profesión.

2.3. Esfuerzos y deformaciones

El esfuerzo es una propiedad de estado en un punto específico dentro de un cuerpo, la cual es una función de la carga, la geometría, la temperatura y el proceso de manufactura. La deformación es la capacidad que tiene un material de resistir un esfuerzo hasta llegar a su punto de ruptura.

Los esfuerzos necesarios para comparar los resultados obtenidos son los siguientes:

- Esfuerzo máximo principal
- Esfuerzo mínimo principal
- Esfuerzo de von mises

Mientras que las deformaciones a las que daremos lugar en nuestro estudio son:

- Deformación máxima
- Deformación en X
- Deformación en Y
- Deformación de Z

Cada uno de estos conceptos se describirá a continuación, con sus respectivas consideraciones, restricciones y formulas, según sea el caso.

2.3.1. Esfuerzo máximo principal

La combinación de esfuerzos normales y cortantes aplicados que produce el esfuerzo normal máximo se le llama esfuerzo principal máximo, σ_1 [2]. Su magnitud se calcula con:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Ecuación 1

2.3.2. Esfuerzo mínimo principal

La combinación de esfuerzos principales aplicados que produce el esfuerzo normal mínimo se llama esfuerzo principal mínimo, σ_2 . Su magnitud se calcula con:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Ecuación 2

2.3.3. Esfuerzo de von mises

El esfuerzo de von mises es una combinación única del esfuerzo principal máximo y el esfuerzo principal mínimo, que se puede comparar en forma directa con el esfuerzo de fluencia del material, para predecir la falla por fluencia. El diseño propuesto se validó con dos técnicas distintas: por el método analítico por el método de elemento finito, para obtener los resultados se usó el *software* ANSYS versión 15.0.

2.3.4. Deformación normal bajo carga axial

Esta sucede cuando se le aplica una carga en un extremo de un elemento, mientras que en el otro extremo se encuentra fijo, suponiendo que sea simétrico este elemento. Esta deformación que se realiza es una relación entre la carga, el material y la forma del material. Existe otro concepto importante la deformación unitaria es la deformación por unidad de longitud. Si la deformación unitaria normal se presenta por ϵ (épsilon), se tiene:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L}$$

Ecuación 3

Donde ϵ es la deformación unitaria, δ es la diferencia de cambio entre longitudes a causa de la carga aplicada y L es la longitud inicial del elemento sometido a la carga axial. En la ecuación 4 se puede observar la ecuación básica del esfuerzo permitido a un elemento sometido a una carga axial constante, donde σ es el esfuerzo, P es la carga y A es el área donde se coloca la carga.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Ecuación 4

Elaborando la gráfica el esfuerzo, utilizando la ecuación 4 en contraste con la ecuación 3, se obtiene una curva que es característica de las propiedades del material y no depende de las dimensiones de la muestra particular utilizada. Esta curva se denomina esfuerzo deformación (figura 2.2), en la cual se realiza todo el proceso de plasticidad y elasticidad con la que cuenta 3 materiales diferentes. Esta grafica cambia de pendiendo de la capacidad a la deformación de cada material como lo es el metal (figura 2.2a), que es un material con una gran capacidad de carga debido a su dureza, el aluminio (figura 2.2b), que es un material ligero y con una gran capacidad de carga y materiales de tipo frágiles (figura 2.2c) que pueden ser compuestos poliméricos, entre otros.

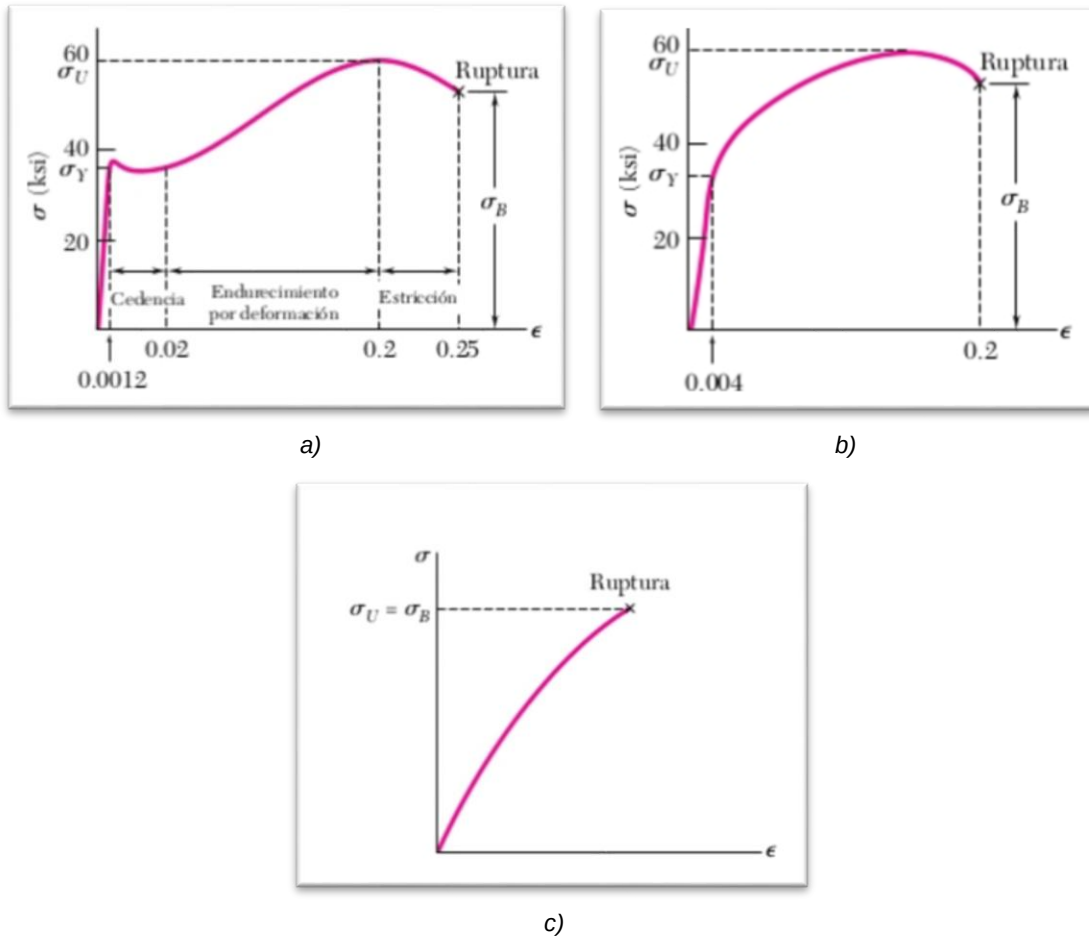


Fig. 2.2. Gráfica de esfuerzo-deformación para tres materiales con diferentes propiedades a) acero al bajo carbono, b) aleación de aluminio y c) material frágil típico [2].

La deformación la elongación y la deformación son propiedades que se presentan en todo elemento mecánico y es necesario conocer estas características para asegurar el correcto funcionamiento del elemento mecánico que se estudia.

2.3.5. Módulo de elasticidad

La mayor parte de las estructuras de ingeniería se diseñan para sufrir deformaciones relativamente pequeñas, que involucran solo la parte recta del diagrama de esfuerzo deformación correspondiente. Para esta porción inicial del diagrama (figura 2.2), el esfuerzo σ es directamente proporcional a la deformación ϵ y puede escribirse:

$$\sigma = E\epsilon$$

Ecuación 5

2.3.6. Deformaciones de elementos sometidos a carga axial

Este caso de deformación es la que hace que el elemento, al ser sometido a una carga en una superficie axial se deforme de una forma uniforme, ya que de esto depende tanto la carga que se aplica, longitud, material y área superficial, todos estos elementos son afectados directamente por la carga axial aplicada. Se despeja ϵ de la ecuación 5 de donde se obtiene:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{AE}$$

Ecuación 6

Donde E es el módulo de elasticidad del material involucrado o, también, módulo de Young. La deformación ϵ se definió en la ecuación 3 se tiene que:

$$\delta = \epsilon L$$

Ecuación 7

Y sustituyendo ϵ la ecuación 6 en la ecuación 7, se obtiene:

$$\delta = \frac{PL}{AE}$$

Ecuación 8

La ecuación 8 se utilizara solo si el elemento es homogéneo (E constante), tiene una sección transversal uniforme con área A y está cargada en sus extremos. Si P_i , L_i , A_i y E_i representan, respectivamente la fuerza interna, longitud, área de sección transversal y módulo de elasticidad que corresponden a la parte i , la deformación del elemento será:

$$\delta = \sum_i \frac{P_i L_i}{A_i E_i}$$

Ecuación 9

La deformación de un elemento de longitud dx se expresa como:

$$d\delta = \epsilon dx = \frac{P dx}{AE}$$

Ecuación 10

La deformación total del elemento se obtiene de integrar esta expresión por la longitud L del elemento:

$$\delta = \int_0^L \frac{P dx}{AE}$$

Ecuación 11

La ecuación 11 debe emplearse en lugar de la ecuación 8, no solo cuando el área de la sección transversal A es una función de x , sino también cuando la fuerza interna P dependa de x , como es el caso de un elemento suspendido y sometido a la acción de su propio peso.

2.4. Elemento finito

El estudio por medio de elemento finito se hace con la finalidad de poder validar datos obtenidos analíticamente con los resultados que se quieren obtener dentro de un rango determinado de limitaciones y de condicionamientos ideales que se le hacen al elemento o al conjunto de elementos que quiere ser estudiado. Es este caso el fémur es una sola pieza de la cual, se pretende obtener, los valores sobre la resistencia de este elemento, simulando su comportamiento habitual y teniendo las consideraciones correspondientes.

Los componentes mecánicos en forma de vigas, barras simples, etc., se pueden analizar con bastante facilidad por medio de métodos básicos de la mecánica que proporcionan soluciones aproximadas. Sin embargo, los sistemas reales rara vez son tan sencillos, y el diseñador se ve forzado a realizar aproximaciones menos eficaces mediante soluciones cercanas, experimentación o métodos numéricos. Existe un gran número de técnicas numéricas que se emplea en aplicaciones de ingeniería para las cuales la computadora digital es sumamente útil. En diseño mecánico, donde el software de diseño asistido por computadora (CAD) se utiliza de manera considerable, el método de análisis que se integra perfectamente con el CAD es el análisis de elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés). La teoría y aplicaciones matemáticas del método son enormes [1]. Existe una gran cantidad de aplicaciones del FEA tales como análisis estático y dinámico, lineal y no lineal, de esfuerzo y de deflexión; vibraciones libres y forzadas; transferencia de calor (que se puede combinar con el análisis de esfuerzo y de deflexión para proporcionar esfuerzos y deflexiones térmicamente inducidos); inestabilidad elástica (pandeo); acústica; electrostática y magnetismo (que se puede combinar con transferencia de calor); dinámica de fluidos; análisis de tuberías y física múltiple. Para los propósitos de este capítulo, nos limitaremos a los análisis mecánicos básicos [1].

Un componente mecánico real es una estructura elástica continua. El FEA divide, las estructuras en pequeñas subestructuras (elementos) de tipo elástico, bien definidas pero finitas. Al emplear funciones polinomiales, en conjunto con operaciones matriciales, el comportamiento elástico continuo de cada elemento se desarrolla en términos del material y las propiedades geométricas del elemento. Las cargas se pueden aplicar dentro del elemento (gravedad, dinámica, térmica, etc.), en la superficie del elemento o en los nodos del mismo. Estos nodos son las entidades fundamentales de gobierno del elemento, en la medida en que el nodo es donde se conecta un elemento con los otros, donde finalmente se establecen las propiedades elásticas de los mismos, donde se asignan las condiciones de frontera y donde, por último, se aplican las fuerzas (de contacto o cuerpo). Un nodo posee grados de libertad (dof, por sus siglas en inglés). Los grados de libertad son los movimientos independientes de rotación y traslación que pueden existir en un nodo. Como máximo, un nodo puede tener tres grados de libertad rotacionales y tres traslaciones. Una vez que cada nodo dentro de la estructura está definido localmente en forma matricial, entonces los elementos se ensamblan (unen) globalmente a través de sus nodos en común (dof) en una matriz global del sistema. Las cargas aplicadas y las condiciones de frontera se especifican entonces y mediante operaciones matriciales se determinan los valores de todos los grados de libertad de desplazamiento desconocidos. Una vez que se ha realizado este procedimiento, es algo simple hacer uso de estos desplazamientos para determinar las tensiones y esfuerzos por medio de las ecuaciones constitutivas de elasticidad [1]. Un ejemplo de este concepto es el estudio que se le hizo a un gancho de carga el cual está sujeto a condiciones de frontera, el estudio de elemento finito se basa en mejorar los puntos más frágiles del elemento mecánico que está sujeto a diferentes cargas y posiciones respecto a un sistema de coordenadas x,y y x (figura 2.3).

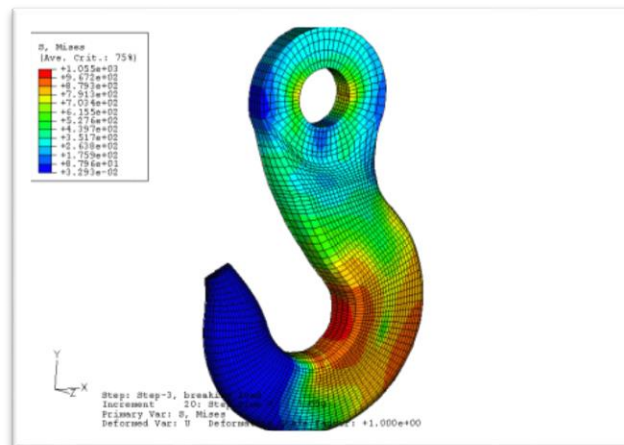


Fig. 2.3. Estudio de elemento finito en un gancho de carga [3].

Desde el punto de vista matemático, el Método de los Elementos Finitos (MEF) puede entenderse como un procedimiento para resolver numéricamente problemas planteados mediante ecuaciones diferenciales. La forma más elegante de explicar los fundamentos matemáticos del MEF parte de la teoría de espacios normados y utiliza los conceptos del análisis funcional [4,5]. Este es el marco en el que hay que situarse si se quieren estudiar con rigor las bases del MEF e investigar sobre sus propiedades matemáticas.

Para construir un modelo numérico se define un número finito de puntos los cuales podrán estar unidos después por líneas para formar superficies y sólidos y de esta manera la geometría a estudiar. Estos puntos se llaman nodos y son los responsables de mantener la continuidad al mantener unidos a los elementos. El sistema es ahora un conjunto de elementos unidos mediante nodos [6]. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales, la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos [7].

2.5. Diseño geométrico

La metrología es la ciencia que trata de las medidas, de los sistemas de unidades adoptados y los instrumentos usados para efectuarlas e interpretarlas. Abarca varios campos, tales como metrología térmica, eléctrica, acústica, dimensional, etc. [8]. Dentro de la metrología podemos encontrar muchas técnicas de medidas, que se utilizan actualmente, debido a que nuestro tipo de medida se base en una muestra que no es siempre igual, tenemos que basarnos en una forma de medida indirecta, por lo cual los más aptos y con el equipo que se tienen para esta investigación, las cuales son la perfilometría y la comparación óptica.

2.6. Perfilometría mecánica

La perfilometría mecánica o de contacto (figura 2.4) es una técnica de análisis superficial 2D, basada en un estilete. La técnica consiste en la medida del desplazamiento vertical que se produce en el estilete mientras se realiza un barrido lineal manteniendo constante la fuerza que éste realiza sobre la superficie de la muestra. La realización de barridos sucesivos y paralelos permite componer los resultados para obtener un mapa tridimensional con resolución micrométrica en el eje vertical. Existen numerosos estiletes diferentes para las distintas aplicaciones, con radios que van desde 50nm a 25 μ m, y de alta relación de aspecto para la

caracterización de zanjas profundas y estrechas [9]. Los resultados serán obtenidos por medio de un ordenador y de ahí se sacaran conclusiones y procedimientos de mejora y/o mantenimiento.

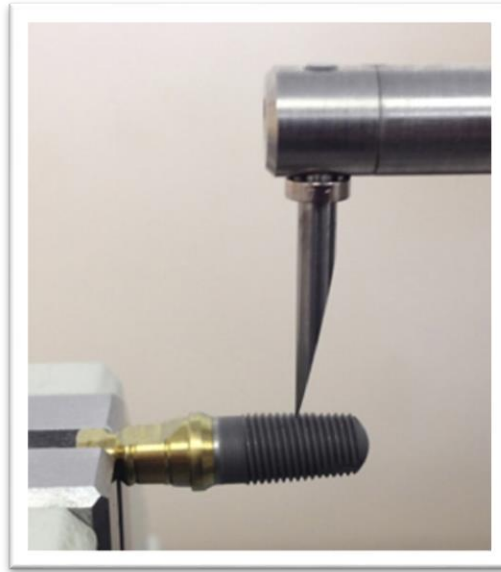


Fig. 2.4. Medición de cuerda con perfilómetro mecánico. [10].

En la práctica se utiliza la longitud de evaluación, la cual puede ser una, tres o cinco veces la longitud de muestreo; este último valor es el más común. La longitud de recorrido será un poco mayor que la de evaluación, ya que si el palpador está en reposo se requiere recorrer una pequeña longitud antes de alcanzar la velocidad normal de recorrido y después realizar un recorrido adicional para que el palpador regrese con una velocidad mayor al punto de origen, preparándose así para una nueva medición (figura 2.5) [8].

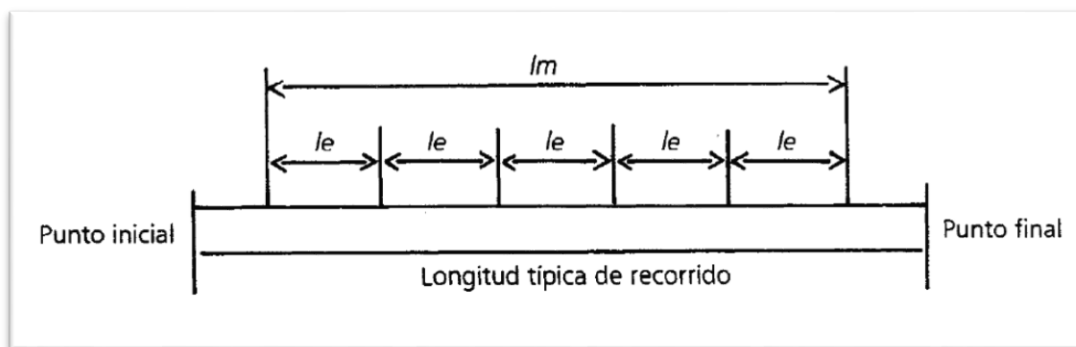


Fig. 2.5. Uso de perfilometría en un recorrido específico [8].

2.6.1. Curvas P y R

Existen dos tipos de curvas importantes cuando se evalúa la rugosidad por el método del perfil. La curva *P* (perfil sin filtrar) es un perfil resultante de la intersección de una superficie con un

plano perpendicular a la superficie. A menos que se especifique otra circunstancia, la intersección debe de ser en la dirección en la cual el perfil representa el máximo valor de la rugosidad de la superficie (figura 2.6).



Fig. 2.6. Curva P [8].

La curva *R* (perfil de rugosidad) es un perfil que se obtiene de la curva *P* removiendo los componente de ondulación de baja frecuencia, cuyas longitudes de onda son mayores que un límite especificado de la longitud de onda llamado valor de *cut-off* (figura 2.7) [8].

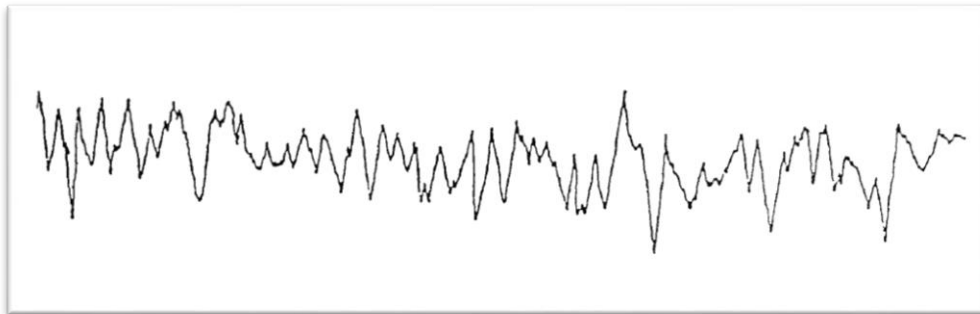


Fig. 2.7. Curva R [8].

En los rugosímetros la longitud de muestreo se varía por medio de filtros que modifican la frecuencia de respuesta del amplificador y, por lo tanto, la forma de onda del perfil para dar lo que se denomina valor de *cut-off*.

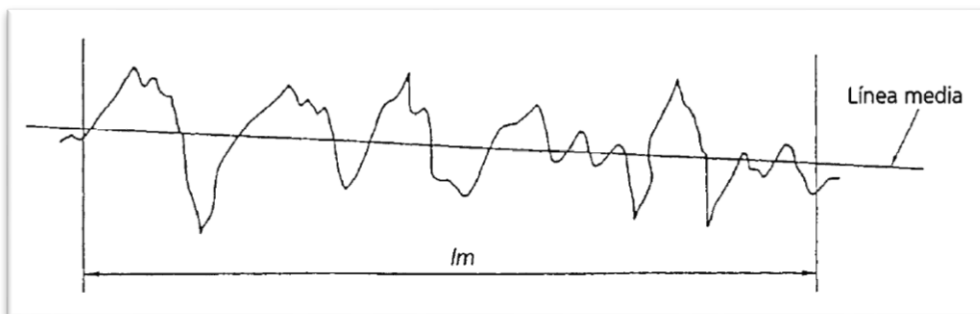


Fig. 2.8. Grafica en la que se muestra la línea media de una medición superficial [8].

La longitud de muestreo es una longitud física de la superficie. El *cut-off* es el medio a través del cual el perfil resultante de la forma de onda simulada la restricción de la evaluación a la longitud de muestreo. Por conveniencia, el *cut-off* es citado como la longitud de muestreo equivalente. Una línea de referencia con la forma del perfil geométrico y que divide al perfil de modo que, dentro de la longitud de muestreo, la suma de los cuadrados de los alejamientos del perfil desde esta línea es un mínimo, se denomina línea media (figura 2.8) [8].

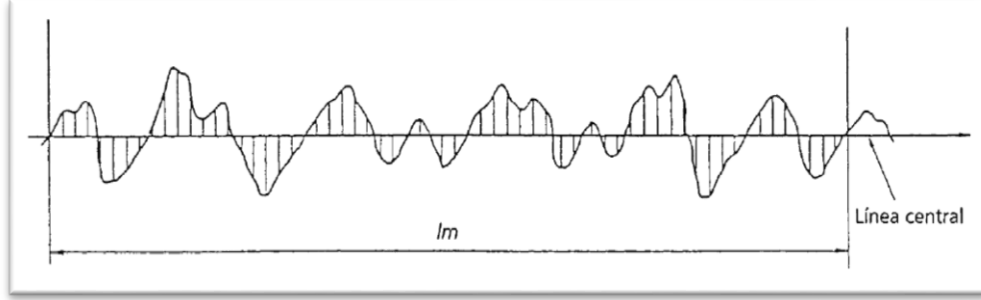


Fig. 2.9. Muestra de la línea central dentro de una medición superficial [8].

Las medidas de la rugosidad por el método de perfil están basadas en una línea central que es paralela a la línea media del perfil a través de la longitud de evaluación, de modo que dentro de esta longitud la suma de las áreas limitados por la línea central y el perfil es igual en ambos lados. (Figura 2.9) [8].

2.6.2. Definición de Ra

Dentro de la longitud de evaluación (lm), la media aritmética de los valores absolutos de los alejamientos del perfil desde la línea central se representa mediante la siguiente formula:

$$Ra = \frac{1}{lm} \int_0^{lm} |f(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(xi)|$$

Ecuación 12

Donde el perfil es definido por $Z = f(x)$ con el eje X para la línea media y el eje Z en la dirección de la amplificación vertical (figura 2.10).

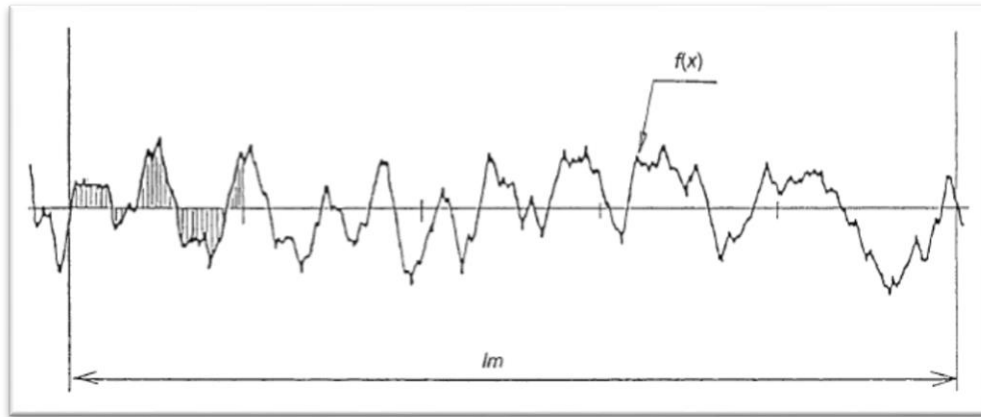


Fig. 2.10. Función de x en comparación con la longitud de evaluación [8].

La definición de Ra equivale, en términos prácticos, a la altura de un rectángulo cuya área es igual, dentro de la longitud de evaluación, a la suma de las áreas delimitadas por el perfil de rugosidad y la línea central (figura 2.11). Ra es rugosidad promedio (también denominada CLA por promedio de la línea central, aunque en el pasado también se utilizó el término AA por promedio aritmético) [8].

Para obtener el valor de Ra más próximo al real se realiza, una analogía tipo espejo, en el cual se presenta por medio de la gráfica (figura 2.11) que es la que se obtiene de la rugosidad o perfil de rugosidad del elemento analizado, lo que se hace es realizar el negativo o el espejeado de la gráfica obtenida y por medio de esto se comparan los valores, marcando una línea como central y otra como la altura Ra , la cual es en donde se intersecta la mayor cantidad de puntos positivos dentro de la gráfica.

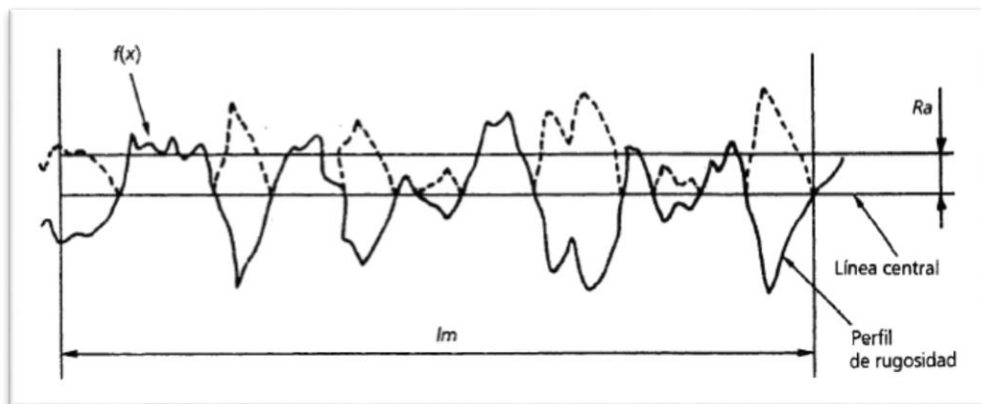


Fig. 2.11. Descripción de partes obtenidas de una medición superficial, tales como lo son la función de x , línea central, perfil de rugosidad, longitud de evaluación y la medida aritmética de los valores absolutos [8].

Con este método, que es meramente gráfico se puede acercar el valor de imperfección superficial lo cual es la rugosidad promedio de la medición por medio del perfilómetro, siendo valores muy

cercanos al real pero siempre con una incertidumbre y un error de medición dentro de los valores analizados.

2.6.3. Definición de Rz

Es el promedio de las alturas de pico a valle se denomina R_z , y las normas JIS/ISO lo definen, con base en la curva P, como la diferencia entre el promedio de las alturas de los cinco picos más altos y la altura promedio de las cinco valles más profundos.

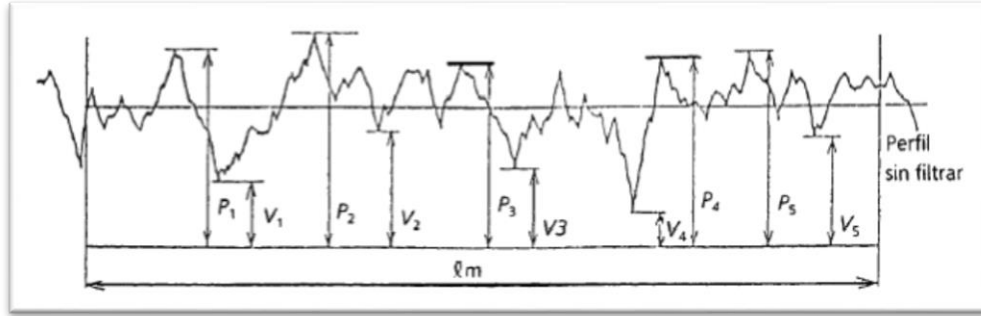


Fig. 2.12. Valles más bajos y picos más altos [8].

Los picos y valles se miden en la dirección de la amplificación vertical, dentro de la longitud de evaluación (l_m), desde una línea paralela a la línea media y que intersecta al perfil (figura 2.12). Con la siguiente ecuación se puede sacar el promedio de las alturas de pico a valle:

$$R_z (JIS - ISO) = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5)}{5}$$

Ecuación 13

El promedio de alturas de pico a valle, denominado R_z , la norma DIN lo define, con base en la curva R, como el valor promedio de la diferencia (Z_i) entre el pico más alto y el valle más bajo de cinco sucesivas longitudes de muestreo (l_e) dentro de la longitud de evaluación (l_m), medida en la dirección de la línea media. La longitud de muestreo (l_c) debe ser la misma que el valor de *cut-off* utilizado.

$$R_z (DIN) = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5}$$

Ecuación 14

Un caso distinto es cuando la longitud suficiente de recorrido no está disponible o se encuentra seccionada, pero dentro de los mismos parámetros de medición (figura 2.13).

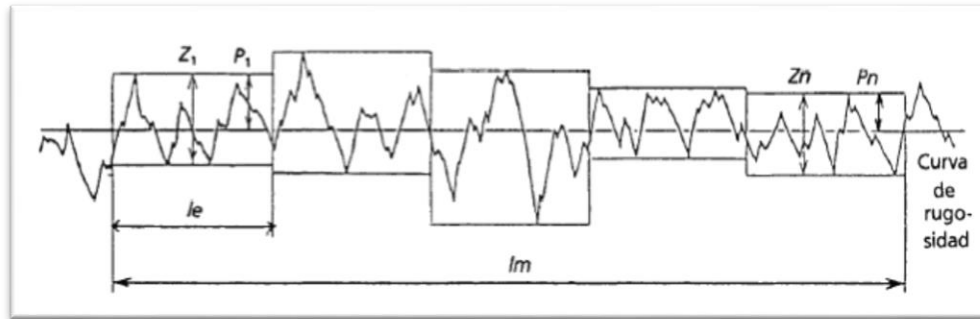


Fig. 2.13. Muestreo superficial no continuo [8].

Se tiene que considerar todos las diferentes medidas para poder acercar las medidas tomadas a un valor más próximo al valor real, mientras mayor sea el número de mediciones menor será el error al momento de sacar el promedio sobre las medidas que se han tomado.

2.6.4. Definición de R_y

La máxima altura del perfil, denominada R_y , las normas JIS/ISO la definen como la distancia entre las líneas de perfil de picos y valles. La máxima altura del perfil, medida en la dirección de la amplificación vertical dentro de la longitud de evaluación (l_m) de la curva P (figura 2.14), la norma DIN la define como el máximo valor de Z_i determinado para R_z DIN [8].

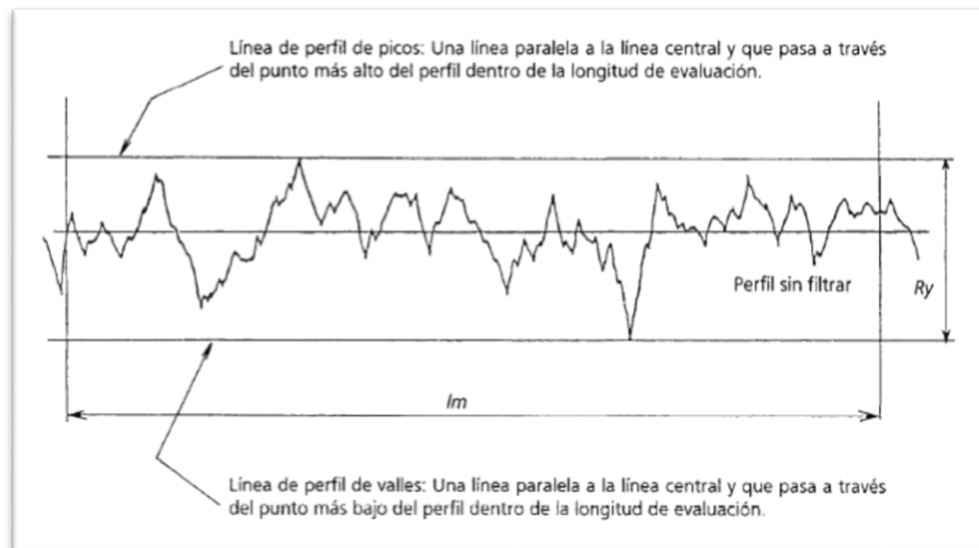


Fig. 2.14. Descripción gráfica de R_y [8].

El valor de R_y es la medida máxima que se presenta en la medición y tiene que ser considerada para lograr esquematizar los resultados tomando en cuenta los valores más altos, los más pequeños y los valores intermedios.

2.7. Comparador óptico (medición visual)

El equipo de medición óptica más utilizado en diversas industrias es el comparador óptico; también se lo conoce como proyector de perfiles, porque es un excelente medio para medir piezas pequeñas a través de la visualización de su imagen ampliificada sobre una pantalla translúcida [8].



Fig. 2.15. Comparador óptico realizando una inspección de calidad y tolerancias [11].

El comparador óptico inventado hace más de 85 años ha cambiado muy poco a través del tiempo y es un equipo que suele mantenerse durante muchos años en condiciones aceptables de trabajo. El principio básico es que la imagen ampliificada de la pieza se proyecta sobre la pantalla y se compara con una plantilla que incluye la zona de tolerancia para cada una de las características inspeccionadas (figura 2.15).

La capacidad de medición lineal utilizando las líneas de referencia trazadas sobre la pantalla se ha incrementado a través del tiempo, iniciando con platinas pequeñas cuyo desplazamiento se medía con cabezas micrométricas analógicas; luego digitales; electrónicas actualmente es muy común encontrar platinas relativamente grandes cuyo desplazamiento se mide con escalas lineales y se muestra en contadores adicionales o integrados al cuerpo del comparador óptico.

2.8. Manufactura

El proceso que se utilizó para la elaboración del prototipo propuesto fue dividido en tres partes, esto con la finalidad de tener un modelo lo más preciso posible, ya que este proceso incluye la fabricación de un esqueleto de cartón que proporcionara la superficie deseada, para continuar con un termoformado para la fabricación del molde y por ultimo obtener el modelo, a partir de material compuesto, para su posterior estudio de tensión. Así que en resumen el proceso de manufactura esta complementado por:

1. Estereotomía (modelado de superficie)
2. Termoformado (fabricación de molde)
3. Modelo fabricado con material compuesto (infusión de polímero por medio de vacío).

2.8.1. Estereotomía

La estereotomía es una rama de la cantería que estudia el modo en que pueden tallarse, partirse y aprovecharse las rocas extraídas de la cantera en arreglo a su colocación específica en obras de arquitectura e ingeniería; la Real Academia Española la define como el arte de cortar piedras y maderas [12]. En la actualidad la estereotomía es aplicada no solo en la construcción de edificio y tallado en piedra, sino también, a la aplicación de geometrías aerodinámicas como lo son para los autos y aeronaves, en las que se hace un modelo inicial y luego se empieza la construcción del prototipo.

La estereotomía (figura 2.16) es una técnica que se utiliza para el modelado de superficies que son irregulares, y por lo tanto, su modelado necesita de una plantilla para poder continuar con la fabricación del modelo deseado.

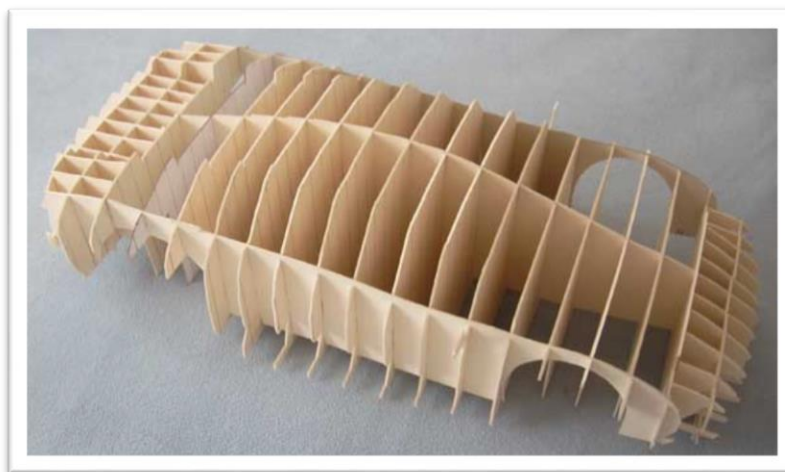


Fig. 2.16. Estereotomía en un automóvil Lamborghini Murciélago a escala. [13]

2.8.2. Termoformado

Termoformado es un término genérico que engloba varias técnicas de procesamiento por las cuales se obtienen artículos plásticos a partir de láminas planas de distintos polímeros. Estos procesos involucran una serie de etapas, como paso inicial el calentamiento de láminas de material polimérico hasta la temperatura de procesamiento, luego éstas son deformadas hacia la superficie de un molde, a menor temperatura, con la forma deseada y finalmente, cuando la lámina se ha enfriado lo suficiente para mantener la forma del molde, esta se retira del área de formado y el exceso de material es removido para obtener la pieza final [14, 15].

El termoformado es un proceso en el que se calienta y deforma una hoja plana termoplástica para hacer que adquiera la forma deseada. El proceso se utiliza mucho para empaquetar productos de consumo y para fabricar artículos grandes como tinas de baño, reflectores de contorno y forros interiores de puertas para refrigeradores [16].

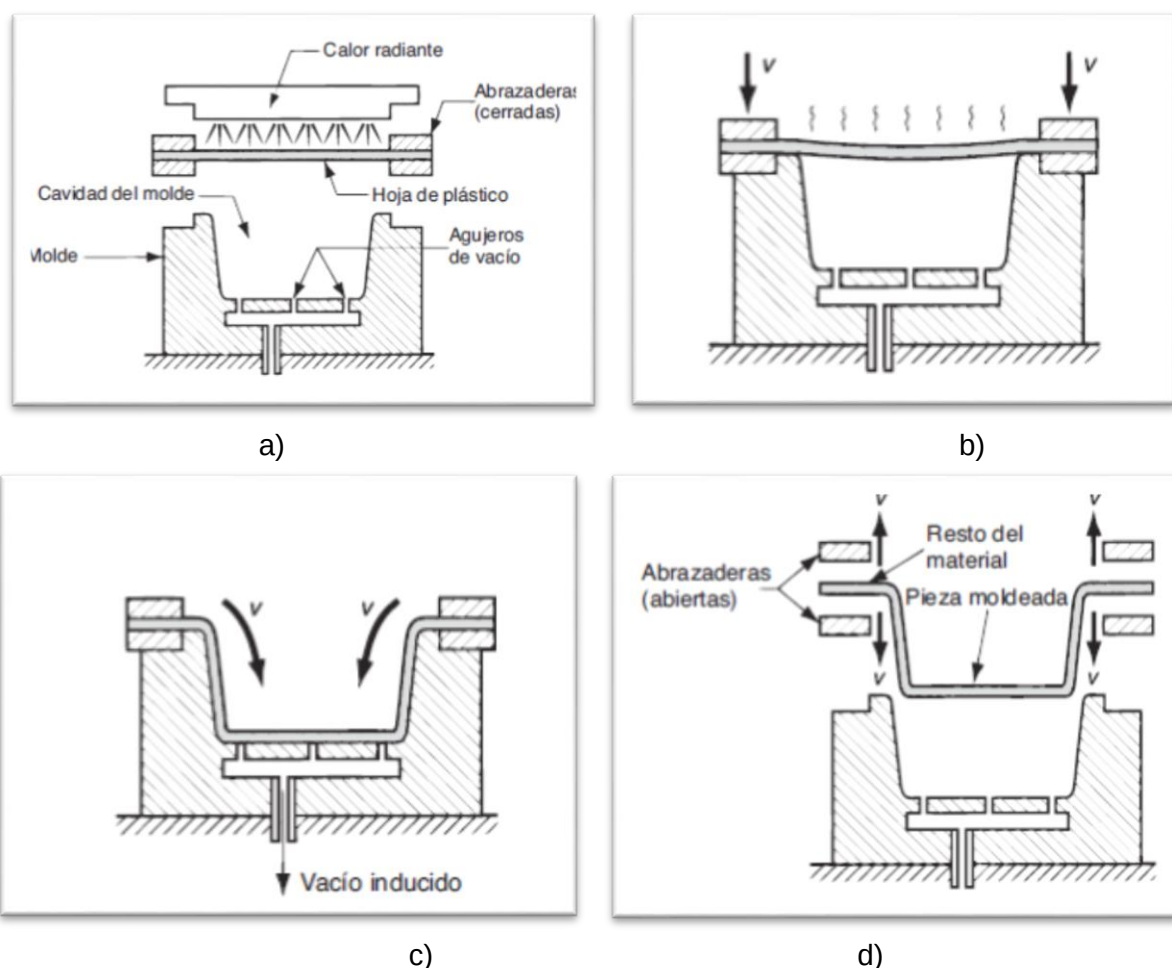


Fig. 2.17. Termoformado al vacío: a) una hoja de plástico se suaviza con calentamiento; b) la hoja suavizada se coloca sobre una cavidad de molde cóncava; c) un vacío empuja la hoja hacia la cavidad; y d) el plástico se endurece al contacto con la superficie fría del molde, y posteriormente la pieza se elimina y recorta del resto del material [17].

Como se mencionó anteriormente, El termoformado consiste en dos etapas principales: 1) calentamiento y 2) formado. Por lo general, el calentamiento se realiza con el empleo de calentadores eléctricos radiantes, localizados a ambos lados de la hoja de plástico inicial, a una distancia aproximada de 125 mm (5 pulg). La duración del ciclo de calentamiento necesario para suavizar lo suficiente la hoja depende del polímero, de su espesor y color. Los métodos por los que se lleva a cabo la etapa de formado se clasifican en tres categorías básicas: 1) termoformado al vacío, 2) termoformado de presión y 3) termoformado mecánico. En el estudio de dichos métodos se describió el formado de materiales en forma de hoja; en la industria del empaque, la mayor parte de operaciones de termoformado se ejecutan sobre películas delgadas [12].

El termoformado a utilizar será el termoformado por medio de vacío (figura 2.17), el cual es muy conveniente y tiene un mejor agarre en nuestra pieza, ya que se cuenta con una superficie irregular y esta tiene que ser adherida completamente al molde para su correcto funcionamiento. La única desventaja es que cualquier imperfección quedaría impregnada en el molde. Para el termoformado al vacío se utiliza una presión negativa para empujar una hoja precalentada contra la cavidad de un molde. Los agujeros para inducir el vacío en el molde son del orden de 0.8 mm (0.031 pulg) de diámetro, por lo que su efecto sobre la superficie del plástico es menor.

2.8.3. Modelo fabricado con material compuesto (infusión de polímero por medio de vacío)

El proceso de Moldeo por Transferencia de Resina (figura 2.18), es un proceso de molde cerrado a baja presión que permite obtener piezas de material compuesto en un amplio rango de complejidad y tamaño, así como componentes de alto rendimiento. El proceso se diferencia de otros procesos de moldeo en que el refuerzo seco y la resina se juntan dentro de un molde para formar una pieza de material compuesto. El refuerzo (fibra), que puede estar preformada se coloca dentro de la cavidad del molde, después el molde se cierra. Un tubo conecta el molde con un depósito de resina, esta es bombeada o transferida dentro del molde para impregnar la fibra, y finalmente se produce el curado [17,18]. Las técnicas de procesamiento que son utilizadas en la fabricación de componentes de materiales compuestos son bastante diferentes de las utilizadas en la manufactura de piezas hechas a base de materiales homogéneos, principalmente los metales, esto se debe a que los materiales compuestos involucran dos o más materiales diferentes [18].

- **Conformado:** La materia prima se transforma a la forma y tamaño requerido, mediante la aplicación de calor y presión. Existen diversas formas de conformado, esta etapa es la

más crucial y compleja de todas porque de esta depende la forma y las propiedades finales que tendrá la pieza [19].

- **Maquinado:** Las operaciones de maquinado son utilizadas para remover el material sobrante o indeseado. El maquinado de materiales compuestos requiere diferentes herramientas y condiciones operativas de las requeridas para la manufactura de metales.
- **Ensamblado:** Esta operación se realiza para unir piezas diferentes, de forma que el componente final pueda realizar la tarea requerida. Dado que estas operaciones consumen tiempo y dinero, deben de ser evitadas lo más posible para reducir costos de producción.
- **Acabado:** Las operaciones de acabado son realizadas por varias razones, como mejorar la apariencia exterior, proteger el producto contra la degradación ambiental, para proveer una capa resistente al desgaste y/o proveer un recubrimiento que de una apariencia metálica.

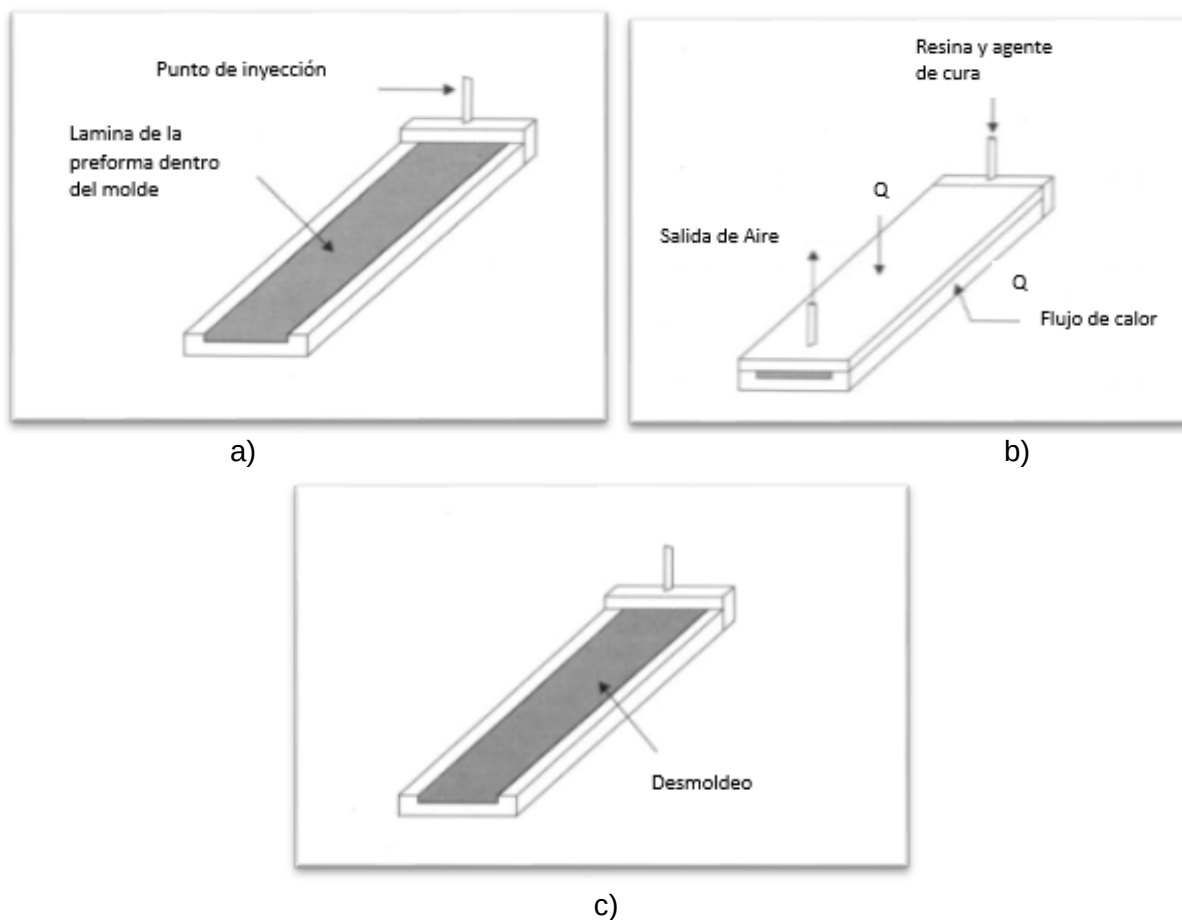


Fig. 2.18. Esquema del proceso de Moldeo por Transferencia de Resina (a) Preformado y colocación del molde (b) Impregnación y curado (c) Desmoldeo [20].

2.8.3.1. Moldeo por transferencia de resina auxiliado por vacío.

Este proceso es una variación del moldeo por transferencia de resina que combina las técnicas del moldeo por inyección y el moldeo por vacío, generalmente utilizando un molde que consta de una sola parte rígida. Mediante el proceso de moldeo por transferencia de resina se consigue buena calidad del producto, sin embargo la presión de inyección obliga a utilizar moldes rígidos que no se deformen durante el proceso de llenado. En el uso de moldeo por transferencia de resina la parte superior del molde puede ser remplazada por una bolsa de vacío, lo cual elimina la necesidad de hacer un molde donde sus dos partes encajen precisamente [21].

Es un proceso que combina un material seco fibroso de refuerzo o de la mezcla de materiales, generalmente referido como una "preforma", con resina líquida durante el proceso de moldeo, con lo que los materiales combinados se curan para producir un componente de 3 dimensiones. RTM es un término que se aplica ampliamente para describir un número de variaciones de este enfoque general de fabricación en todo el aeroespacial y de industrias aeroespaciales con muy diferentes resultados en términos de la calidad del producto final. El de RTM convencional emplea herramientas cerrado "duro", similar a la utilizada para el moldeo por inyección, la cual encierra completamente la preforma y controla con precisión todas las superficies del componente de una variación de los proceso de RTM convencional es asistida RTM (VARTM) de vacío, que emplea un útil de una sola cara, teniendo enfoque con una barrera de película flexible (bolsa de vacío) para definir la superficie "no labrado". Del mismo modo, algunos variaciones pueden definir libremente la preforma como formas simples capas que se colocan sobre la superficie de la herramienta de moldeo con poco respeto a la orientación o el control de ubicación, mientras que otros emplean materiales adicionales, herramientas y en pasos de procesamiento Terim para controlar con precisión estas características de la preforma. Los componentes utilizados en la crítica aplicaciones estructurales generalmente garantizan una versión más sofisticada y bien controlada del proceso RTM con el fin de obtener un producto final repetible y fiable. Es importante que el usuario o diseñador final de un componente de RTM conozca la aplicabilidad o validez de material permisibles generados por combinaciones de materiales RTM, y, además, la capacidad de "certificar" la RTM se aplica como una solución rentable medios para producir un componente debido a su uso de con materiales constituyentes en sus formas más simples, y por lo tanto menos caros por el productor del componente. Además, en RTM molde cerrado convencional, debido a la naturaleza del proceso, extremadamente complejo formas y vías de carga de 3 dimensiones se pueden obtener el Número de parte , y por lo tanto minimizar el coste del producto final .

A diferencia de RTM convencional que tiene la capacidad de producir detalles de la pieza de gran complejidad, VARTM produce detalles de la pieza similares para abrir molde se utilizan técnicas de herramientas desde una cara similar. Dado que el proceso VARTM lo general no requiere presión elevada o de calor superior a 200 ° F, los costos de herramientas son mucho más bajos que para autoclave cura abierta molde o RTM convencional. Probablemente el proceso VARTM más conocido es SCRIMP (“Seemann Composites Resin Infusion Molding Process”), que con éxito se ha aplicado a numerosos estructuras marinas, principalmente los cascos de embarcaciones de recreo. Otros procesos VARTM de propiedad incluyen el Método de Marco, Paddle Lite, Prestovac, Resina de inyección de molde de recirculación (RIRM) y ultravioleta (UV) VARTM.

La consideración cuidadosa se debe dar, sin embargo, la hora de diseñar el componente o especificando el proceso RTM, para determinar aquellas características que son necesarias para la aplicación a fin de no hacer mal uso de la fabricación cuando una variación puede ser más rentable. El proceso de RTM convencional comienza con la fabricación de la preforma mediante el cual la rienda–fibrosa material de refuerzo o materiales se forman y lo ensamblan para producir los caminos de geometría y de carga justificado por la aplicación.

Estos materiales fibrosos pueden ser tejidas en “broadgoods”, trenzado tubular o aplicado directamente sobre las herramientas, ni combinar y lo procesado con material adicional ALS tales como aglutinantes o agentes de pegajosidad que definirán la geometría del refuerzo en el producto final. Asimismo, el refuerzo 3 - dimensional se puede incorporar en la preforma como parte del tejido o proceso de trenzado, o como procesos secundarios tales como cosido o técnicas de inserción de fibra alternativos [22].

Los siguientes pasos generales se emplean para cualquier proceso de RTM:

1. Producir la preforma de refuerzo fibroso (tejido, trenzado, corte, conformado, montaje).
2. Localice la preforma en la herramienta o en el molde (esto también puede implicar aún más el montaje de pre-formas o materiales de refuerzo).
3. impregnar la preforma con resina líquida (esto puede requerir precalentamiento del utillaje montado y preforma, el calentamiento de la resina, la aplicación de vacío y/o presión).
4. Cura (temperatura ambiente, temperatura elevada, o las técnicas de curación alternativos).

5. Retire componente curado de herramental para su posterior procesamiento.

6. Repita la cura (si es necesario).

Esto fueron los fundamentos en los cuales se basó la investigación desde la medición hasta la fabricación del prototipo del fémur. Es necesario establecer bien las bases para el continuo desarrollo del proyecto.

El estudio de elemento finito es una tecnología muy novedosa y una herramienta que está en un crecimiento constante en la actualidad, ya que este proceso es analítico y en su mayor parte computacional, por lo cual va a la par de la tecnología que se presenta y se actualiza día con día, tanto software como hardware. El estudio de elemento finito es un estudio bastante complejo en cual se analizan diferentes casos y condiciones que se pueden presentar para algún elemento o un grupo de elementos en particular, desde una viga hasta una estructura completa, como un puente edificio o un chasis de un carro.

Por otro lado la metrología es una herramienta que ayudó a caracterizar el fémur junto con el comparador óptico, con estas dos ciencias se realizó una práctica con el fin de poder tener todas las características geométricas del fémur del grillo y poder posteriormente realizar un modelo tridimensional.

Los fundamentos para la manufactura del el prototipo son muy importantes ya que son procesos muy específicos y tiene que ser seguidos al pie de la letra. Los procesos implementados en este proyecto son dos, los cuales son estereotomía, termoformado e infusión de resina.

Bibliografía Capítulo 2

- [1] Budynas. R. G., Nisbett, J. K. (2011). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9ª ed.). Mexico: Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- [2] F. P. Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., y Mazurek, D. F. (2009). *Mecánica de materiales* (5ª ed.). D.F., Mexico: Editorial Mc Graw Hill.
- [3] LAMEF (2014). *Materials Engineering*. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: http://www.lamef.demet.ufrgs.br/english/trabalho/engenharia_materiais.html
- [4] Oden, J. T., y Carey, G. F. (1983). *Finite Elements - Mathematical Aspects*. Estados Unidos: Editorial Prentice-Hall.
- [5] Reddy, J. N. (1986). *Applied Functional Analysis and Variational Methods in Engineering*. Estados Unidos: Editorial McGraw-Hill.
- [6] Zienkiewicz, R. L. y Taylor, R. L. (1989). *The Finite Element Method*, (4ª ed.). Estados Unidos: Editorial McGraw Hill-
- [7] Ortiz P. A., y Ruiz C. O. (2007). *Conceptos Básicos del Método por Elemento Finito*. Unidad de Investigación y Apoyo Técnico en Materiales Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [8] Gonzales C., y Zeleng, R. (1995). *Metrología*. México: Editorial McGraw-Hill, primera edición.
- [9] Telstar (2013). Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.telstar-instrumat.com/productes/metrologia%20de%20superficies/perfilometria%20mecanica.htm?language=ca>
- [10] Paz, M. L., Villarreal L. J., y Paz, J. A. (2015). *Análisis de esfuerzos con elemento finito para optimizar el diseño de implantes dentales*. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/133873-Analisis-de-esfuerzos-con-elemento-finito-para-optimizar-el-diseno-de-implantes-dentales.html>
- [11] Herramental (2015). Comparador Óptico Serie 172. Consultado el 26 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.herramental.com.mx/comparador-optico-serie-172/>
- [12] Diccionario de la lengua Española (2014). El Diccionario de la lengua española es la obra de referencia de la Academia (23ª ed.).

- [13] Car Desing (2009). *Estereotomia del Lamborghini Murcielago*. Proyecto. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.todoautos.com.pe/f107/planos-de-lamborghini-murcielago-68738/index9.html>
- [14] Throne, J. (1999). *Understanding Thermoforming* (1a ed.). Alemania: Editorial Hanser.
- [15] Harron, G., Harking-Jones, E., Martin P. (2001). *An Experimental Investigation of the Plug Assist Thermoforming Process*. SPE's ANTEC Proceedings, pp 825-829.
- [16] Groover, M. P. (2007) *Fundamentos de manufactura moderna*.
- [17] Potter, K. (1997). *Resin Transfer Moulding*. Londres Inglaterra: Editorial Chapman and Hall.
- [18] Military HandBook 17 (2002). *Composite Materials Hanfbook*.. Volumen 3, Estados Unidos. Departamento de Defensa.
- [19] Wilkins, D. J., et al. (1994). *Advanced Manufacturing Technology for Polymer Composite Structures in Japan*. Maryland, Estados Unidos: Loyola College. Consultado el 25 Enero del 2016. Disponible en: <http://www.wtec.org/loyola/polymers/toc.htm>
- [16] Miravete, A. (2003). *Materiales Compuestos*. Volumen I y II. España: Asociación Española de Materiales Compuestos.
- [21] Song, X., (2003). *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification*. Blacksburg, Virginia. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04232003->
- [22] Mazumdar, S. K., (2002). *Composites Manufacturing: materials, product, and process engineering*. Nueva York, Estados Unidos: Editorial CRC.

Capítulo 3

*Metodología y caracterización
dimensional del fémur*

Capítulo 3. Metodología y caracterización dimensional del fémur

En este capítulo se habla de las mediciones que se realizaron en diferentes especímenes para poder llegar a un modelo tridimensional básico en el cual se realizó el estudio del elemento finito para conocer el comportamiento del fémur estudiando, simulando las cargas que impactan sobre este elemento al momento de un salto o una posición en la que se encuentre, bajo un gran esfuerzo.

3.1. Metodología

En esta investigación, la metodología que se utilizó para poder realizar un estudio y un modelado de la geometría del fémur del insecto *Calliptamus barbarus* fue el proceso de diseño mecánico, el cual está constituido de varias etapas. En base a este tipo de metodología lo que se hizo fue adaptar cada uno de nuestros pasos para poder darle seguimiento a la investigación. Los pasos que se plantearon fueron los siguientes:

1. Definición del problema o necesidad
2. Caracterización dimensional
3. Estudio de elemento finito
4. Manufactura
5. Presentación final

Antes que nada se planteó una idea inicial, la cual fue analizar qué efecto tiene la estructura geométrica del fémur del grillo en los saltos que el insecto realiza, dentro de todo este debate y lluvia de ideas se buscó la implementación de este tipo de estructuras dentro del entorno mecánico y práctico para el uso de este elemento. A partir de este punto se tenía ya el planteamiento de la idea y el inicio de la hipótesis que se presentó. Después de definir el problema se hace la pregunta ¿cómo le daremos solución a esto? En este estudio la metodología se dividió en 4 partes que son: la caracterización, el modelación y el estudio de elemento finito, y la manufactura del fémur como tal, con las adaptaciones y dimensionamiento correspondiente. El proceso de diseño de fémur inicia con el análisis de un grupo de insectos; se hizo una observación para visualizar los segmentos que integran el elemento natural. Mediante este proceso de observación directa sobre los especímenes se caracterizó su funcionamiento y se graficó para representar los componentes y sus relaciones.

El objetivo de este experimento es medir por medio de un perfilómetro el perfil de la superficie del fémur del grillo. Se utilizaron 10 especímenes diferentes, para proceder a la creación del

modelado en 3D y poder realizar el estudio mecánico del fémur del insecto y ver de qué manera se comporta su estructura comparada con los esfuerzos que se aplican en ella, para saber si es apta para la creación de exoesqueletos. Estas especies fueron adquiridas en un mercado, donde se contaba con grillos frescos, los cuales son utilizados para realizar platillos tradicionales de México. También se consiguieron un par de muestras en Tijuana, Baja California, México.

3.2. Caracterización dimensional

Es necesario conocer las dimensiones con las que cuenta el fémur del insecto ya que con estas medidas se puede continuar con el modelado, por medio del análisis detallado y el uso de herramientas de medición de precisión. Las dimensiones con las que cuenta cada elemento entran en cierta parte de la industria elabora productos cuyo control de calidad se basa en la medición de parámetros complejos, muchos de estos parámetros actualmente son medidos por instrumentos sofisticados [1], como lo sería la microscopía, cuyos orígenes se remontan a la observación de diminutos seres vivos. La idea tan sencilla de ir restringiendo la iluminación del espécimen a sólo un punto (o una serie de puntos) y escanearlo para producir una imagen completa, así como insertar una apertura en el sistema óptico, origina que físicamente que la luz emanada de las regiones por arriba y por debajo del plano o elemento contribuyan a la obtención de una imagen clara [2].

3.3. Perfilometría mecánica

Por medio del dimensionamiento se obtuvieron las medidas como longitudes y ángulos para obtener el perfil exacto del fémur de grillo, con esto se realizó el modelado tridimensional, contando con las dimensiones reales de los insectos seleccionados. A partir de estos resultados se realizó el p elemento mecánico.



Fig. 3.1. Especimen a medir. [3]

Se seleccionaron especímenes que posteriormente fueron analizados, y en base a cada medida, se realizó una media para contar con el prototipo, ya que los tamaños del fémur varían con el tamaño del grillo pero la estructura es la misma (figura 3.1). Teniendo en cuenta esta consideración se procede con la medición del perfil de cada fémur para sacar un valor intermedio, el cual se está considerando para estandarizar una medida con un valor medio, obtenido de la medición de los diferentes especímenes seleccionados, con el cual se guio esta investigación como se puede observar en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Mediciones tomadas por el perfilómetro (Mitutoyo CONTRACER CV-2000Series) [4].

No. de Medición	Mediciones longitudinal	Longitud de arco radial
1	13.13mm	4.21mm
2	13.12mm	4.19mm
3	13.09mm	4.10mm
4	13.08mm	4.15mm
5	13.00mm	4.35mm
6	13.12mm	4.09mm
7	13.00mm	3.81mm
8	13.03mm	4.20mm
9	13.00mm	3.70mm
10	13.20mm	4.26mm

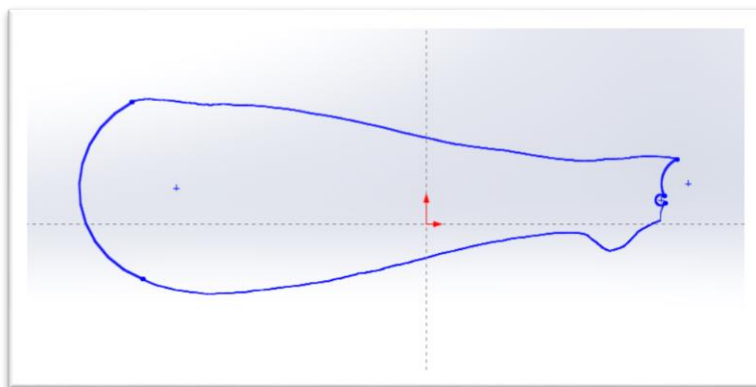


Fig. 3.2. Contorno obtenido por medio del perfilómetro e importado a un programa CAD.

Las medidas que se realizaron dependían, de la calidad de la conservación de la muestra y por el tamaño del fémur analizado, ya que aunque sean de la misma familia y visualmente sean iguales, estas muestras varían por centecimas de milímetros el contorno del perfil (figura 3.2).

3.4. Comparación óptica

En base a las mediciones que se realizaron, se pudo comprender mucho mejor la composición de la estructura del fémur de una muestra de diez grillos y la estructura del grillo está diseñada para que se distribuyan los esfuerzos en esta, ya que teniendo entre cada soporte un ángulo de desviación igual al soporte interior, podemos suponer que la carga se distribuye hacia los costados del fémur que es en donde se encuentra unidos todos los segmentos del fémur. De esta manera se podría comprender como es que los grillos soportan la caída de sus saltos, claro está, que las escamas con las que cuentan ayudan a mantener todo en su lugar y amortiguar el impacto junto con sus patas traseras.

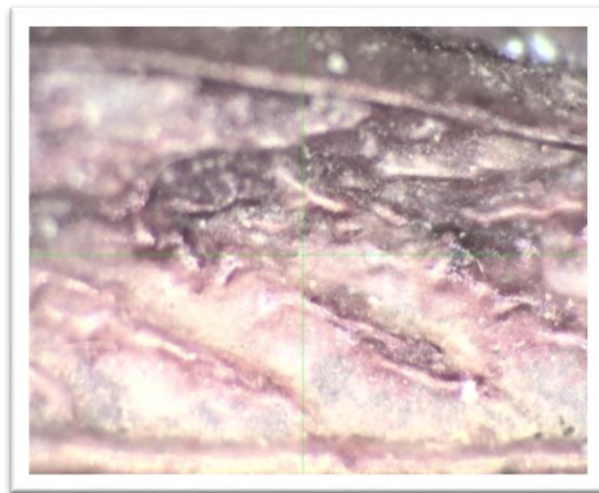


Fig. 3.3. Fémur del grillo (50x comparador óptico).

Mediante el comparador óptico, Swift-Duo V2.0 [5], se pudo observar el ángulo con el que cuenta cada una de las escamas que completan la estructura del fémur (figura 3.3). De esta manera podemos concretar que, el fémur, cuenta con la característica particular que es distribuir los esfuerzos hacia la parte más fuerte del fémur, que es la corteza.

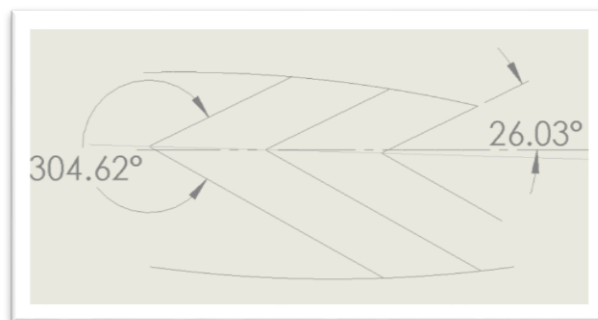


Fig. 3.4. Líneas trazadas comparadas con el comparador óptico.

Se compara cada uno de los parámetros obtenidos. Cada segmento cuenta con la misma separación y la misma desviación angular que es de 26.03° . Mientras que externamente cada segmento cuenta con una separación igual a 304.62° (figura 3.4).

Se sabe que los grillos cuentan con una gran capacidad tanto como para realizar sus saltos como para soportarlos creemos que estas medidas serán de gran utilidad para el uso de este nuevo prototipo.

3.5. Levantamiento 2D

En base a los resultados obtenidos en la sección 3.1 y 3.2 se tiene el siguiente croquis como base para el diseño del prototipo, al cual se le hace mención como levantamiento 2D (figura 3.5), que es el bosquejo preliminar principal que cuenta con las dimensiones y las características más significativas del elemento en cuestión.

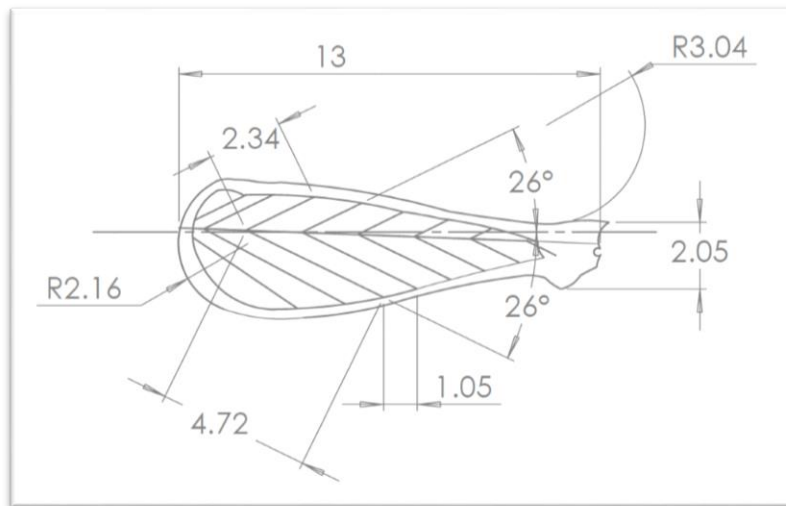


Fig. 3.5. Levantamiento 2D. Medidas reales del fémur en milímetros.

El fémur no cuenta con una forma regular externamente, pero la parte interna cuenta con la misma secuencia (figura 3.5). De esta manera se sabe que la evolución del grillo lo ha llevado a realizar esta configuración en su propia estructura. Dentro de este dibujo el eje neutro del grillo se ve claramente desfasado con respecto al fémur en si (figura 3.6), el cual cuenta con dos contornos y de la misma forma con partes perfectamente seccionadas dando la forma de flecha a cada una de estas secciones.

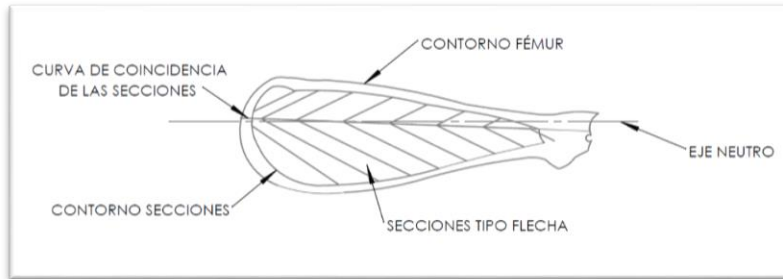


Fig. 3.6 Partes del fémur dentro del croquis.

El fémur tiene una medida de 13 mm y un radio de 2.16 mm en su parte más ancha, (figura 3.5). También se puede observar el dimensionamiento de las secciones y los ángulos presentes con respecto al eje neutro. Este croquis realizado nos ayudó a obtener de una manera mucho más exacta y clara un levantamiento en 3D para tener un prototipo y posteriormente realizar su fabricación.

3.6. Dibujo 3D

En base al levantamiento 2D que se realizó se propone un modelo tridimensional (figura 3.7), con el cual se puede decir que por medio de las líneas en la parte superior del fémur forman un marco estructural dentro de la pieza. A pesar que el fémur cuenta con un segmento más grande que el otro no es una sección en la que se acumulen esfuerzos ya que las franjas con las que tiene ayuda a mandar los esfuerzos hacia los costados y se concentran en el borde de la estructura. El programa que se utilizó para realizar tanto el levantamiento 2D, como el modelado en 3D, fue Solidworks 2015. Este software ofrece una funcionalidad de diseño potente con la intuitiva interfaz de usuario de SolidWorks, de este modo se agilizará el proceso de diseño y será productivo desde el principio [6].

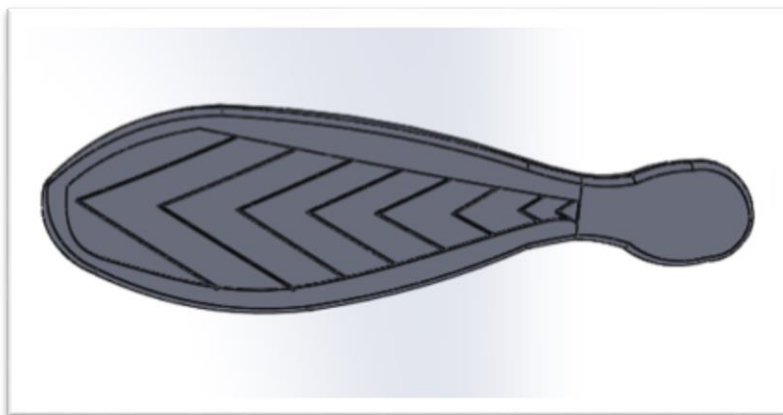


Fig. 3.7. Imagen 3D del fémur del grillo.

La medida final del dibujo es de 111.164 mm de alto, 402.735 mm de largo y 18.981 mm de ancho suponiendo que sea una placa rectangular, que es una escala de 26:1, esto significa que el diseño que se propone es 26 veces más grande, aproximadamente al tamaño original del fémur, sin perder las características de las muestras medidas. Esta variación en tamaño se realizó con el simple propósito de poder utilizar este modelo para la futura aplicación en exoesqueletos o estructuras mecánicas y que el resultado sea correspondiente a los estudios realizados basados en la biometría femoral. La longitud del fémur no es un valor fijo ya que depende de la persona y de su genética, se tiene un rango de la longitud, obtenido de un muestreo, el cual está dentro de un rango de 360 mm a 450 mm [8], el prototipo que se propone tiene una medida de 372 mm. El prototipo cuenta con las dimensiones necesarias para poder colocarse externamente en la posición del fémur humano.

3.7. Propiedades físicas del modelo

Para cuantificar el resultado de este estudio y tener un rango de comparación se optó por utilizar acero estructural conforme a la norma ASTM A36. La norma ASTM 36 es aplicable a una gran variedad de perfiles estructurales laminados en caliente y a placas de la misma calidad que aún están disponibles en el mercado mexicano. Tiene un esfuerzo de fluencia de 2 530 kg/cm² (250 MPa, 36 ksi) y un esfuerzo mínimo de ruptura en tensión de 4 080 kg/cm² a 5 620 kg/cm² (400 a 550 MPa, 58 a 80 ksi), y su soldabilidad es adecuada. Se desarrolló desde hace muchos años en Estados Unidos para la fabricación de estructuras remachadas, atornilladas y soldadas, mejorando el contenido de carbono de los aceros disponibles en aquella época, como el ASTM A7. Con la innovación de este tipo de acero, las conexiones soldadas empezaron a desplazar a las remachadas que pronto desaparecieron [9].

Entre las especificaciones físicas del modelo, se obtienen los siguientes resultados, tomando en cuenta la geometría y las características con la que cuenta este prototipo, lo cual ya se mencionó en capítulos anteriores.

En la tabla 3.2 se puede observar la masa, el volumen y el área superficial con la que cuenta el fémur propuesto.

Tabla 3.2 Propiedades físicas generales del modelo.

Propiedad física	Unidades
Masa	356.70 gr (0.79 lb)
Volumen	356698.79 mm ³ (21.77 in ³)
Área de superficie	81553.34 mm ² (126.41 in ²)

En la tabla 3.3 se puede observar el centro de masa en milímetros del fémur propuesto, que es con el que se realizara el proceso de manufactura posteriormente.

Tabla 3.3. Centro de masa del modelado.

Centro de masa		
Eje	Mm	pulg
X	735.03	28.94
Y	262.22	10.32
Z	692.40	27.26

En la tabla 3.4 se observan los ejes principales de inercia y en la tabla 3.5 momentos principales de inercia: estas Medidas son desde el centro de masa.

Tabla 3.4. Ejes principales de inercia.

Eje	gr/mm ²	lb/pulg ²
Ix	(-0.01, 1.00, 0.00)	(-0.01, 1.00, 0.00)
Iy	(-1.00, -0.01, 0.04)	(-1.00, -0.01, 0.04)
Iz	(0.04, 0.00, 1.00)	(0.04, 0.00, 1.00)

El momento de inercia es una propiedad del sólido que indica la capacidad de giro de la sección respecto a un eje. Cuanto mayor sea el momento de inercia, mayor será el radio de giro característico de la sección. El momento de inercia también se puede interpretar como una medida de lo alejados que están los distintos puntos de una sección del eje: cuanto más alejados, mayor es el producto de inercia. [7]

Tabla 3.5 Momentos principales de inercia

Momento	gr/mm ²	lb/pulg ²
Px	230336.59	0.79
Py	2827872.62	9.66
Pz	3045938.36	10.41

Momentos de inercia, obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

Tabla 3.6 Momento de inercia respecto al centro de masa

Eje X	g/mm ² (lb/pulg ²)	Eje Y	g/mm ² (lb/pulg ²)	Eje Z	g/mm ² (lb/pulg ²)
Lxx	2827887.31 (9.66)	Lxy	-26395.84 (-0.09)	Lxz	-7908.16 (-0.03)
Lyx	-26395.84 (-0.09)	Lyy	230616.79 (0.79)	Lyx	5722.86 (0.02)
Lzx	-7908.16 (-0.03)	Lzy	5722.86 (0.02)	Lzz	3045643.47 (10.41)

Momentos de inercia, Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

Tabla 3.7 Momentos de inercia.

Eje X	g/mm ² (lb/pulg ²)	Eje Y	g/mm ² (lb/pulg ²)	Eje Z	g/mm ² (lb/pulg ²)
lxx	198364020.53 (677.84)	lxy	68723300.37 (234.84)	lxz	181530273.93 (620.32)
lyx	68723300.37 (234.84)	lyy	363955133.15 (1243.70)	lyz	64768364.61 (221.32)
lzx	181530273.93 (620.32)	lzy	64768364.61 (221.32)	lzz	220286098.13 (752.76)

El sistema de coordenadas en el que se basó el modelado del fémur fue buscando la intersección entre el eje neutro y el centro de la pieza, referenciando las coordenadas de origen del diseño propuesto, de la cual, se sacaron todos los valores sobre las propiedades físicas de este elemento mecánico (figura 3.8).

El modelo tridimensional que se obtuvo, por medio de la perfilometría mecánica y el comparador óptico, es el resultado de la selección y comparación que se enfocó en la estandarización de un elemento, la cual se tomó en cuenta por el tamaño del fémur. Esta estandarización se realizó con

el fin de encontrar un punto medio en las diferentes secciones del elemento para tener un elemento que cumpla con todas las condiciones que se han caracterizado, como lo son perfil, longitud de arco principal, Angulo entre secciones, longitud total del elemento, perímetro del fémur. Cada muestra tuvo un valor diferente en la medición, ya que esta parte del insecto cambia dependiendo del tamaño.

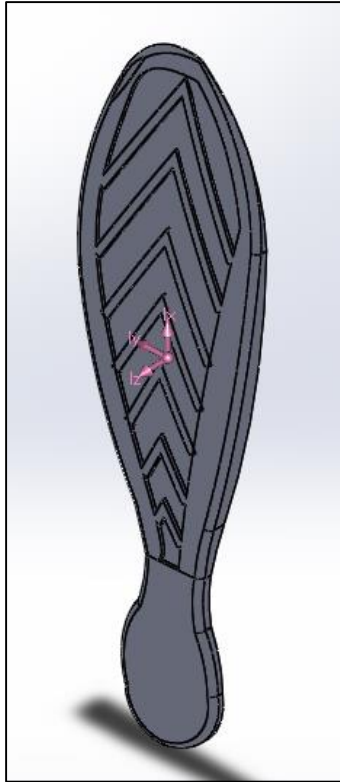


Fig. 3.8. Centro de la pieza, con sus ejes coordenados en X Y Z.

Las características más importantes que se encontraron en esta práctica fueron los segmentos con los que cuenta el fémur del insecto ya que se crean un marco estructural dentro de la pieza. Las especificaciones de masa, volumen y área son para la manufactura del fémur y tener un estimado del material que se utilizó para la fabricación final del elemento.

Bibliografía Capitulo 3

- [1] Wirandi J., Lauber A. (2006). *Uncertainty and traceable calibration – how modern measurement concepts improve product quality in process industry*. Measurement 39 612-620.
- [2] Pfeifer T., Freudenberg R., Dussler G. y Bröcher B. (2001). *Quality control and process observation for the micro assembly*. Measurement 301–3.
- [3] Biodiversidad (2002). *Calliptamus barbarus*. Consultado el 25 de enero del 2016. Disponible en: <http://www.biodiversidadvirtual.org/insectarium/Calliptamus-barbarus-2-2-img436615.html>
- [4] Mitutoyo (2005). Mitutoyo manual de especificaciones, pp. 550, 551 y 552. Consultado el 26 de Enero del 2016. Disponible en: www.mitutoyo.com.mx/Catalogo%20Digital/catalogo.../05_calipers.pdf
- [5] Vision Engineering (2016). Swift Swift-Duo Brochur v2.0 Catalogo. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.visioneng.com/es/productos/medicion-sin-contacto/swift-duo-sistema-de-medicion-de-optica-y-video>
- [6] Solidworks (2016). Consultado el 30 de mayo del 2016. Disponible en: <http://www.solidworks.es/sw/products/3d-cad/packages.htm>
- [7] Facultad de náutica de Barcelona (2002). Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica. Consultado el 26 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.fnb.upc.edu/mecanica/s01-gm/Geometr%C3%ADa%20de%20Masas%20-%20Definiciones.pdf>
- [8] Casteleiro G., Castaño C., San Martín A., Gómez L., y Rodríguez R. (1995). *Biometría femoral: Curva diafisaria y longitud anatómica. Estudio de las correlaciones*. Departamento de Cirugía Ortopédica, Traumatología y Rehabilitación, Hospital General Universitario Gregorio Marañón. Madrid.
- [9] Miechielsen L. y Elizondo M. (2013). *Manual de diseño para la construcción con acero*. AHMSA Altos hornos de México.

Capítulo 4

Resultados

Capítulo 4 Resultados

En este capítulo se describe el estudio realizado, así como las consideraciones que se hicieron para poder tener los resultados más precisos y tener la certeza de que estos valores son los más óptimos y que son confiables para su aplicación. Se presentan los conceptos principales los cuales son aplicados en el estudio mecánico que se desarrolla en la actualidad sin la necesidad de aplicar grandes sumas de dinero en pruebas físicas.

4.1. Estudio de elemento finito

Como se mencionó al principio de este capítulo, el cual habla del dimensionamiento del fémur, se obtuvo un modelo 3D, con el cual se realizó el estudio de elemento finito. Este experimento consistió en someter el prototipo a esfuerzos para comprobar si el fémur (fig. 4.1) en realidad mejora la distribución de esfuerzos sobre todo su volumen. Se utilizó ANSYS 15.0 para validar los resultados obtenidos.

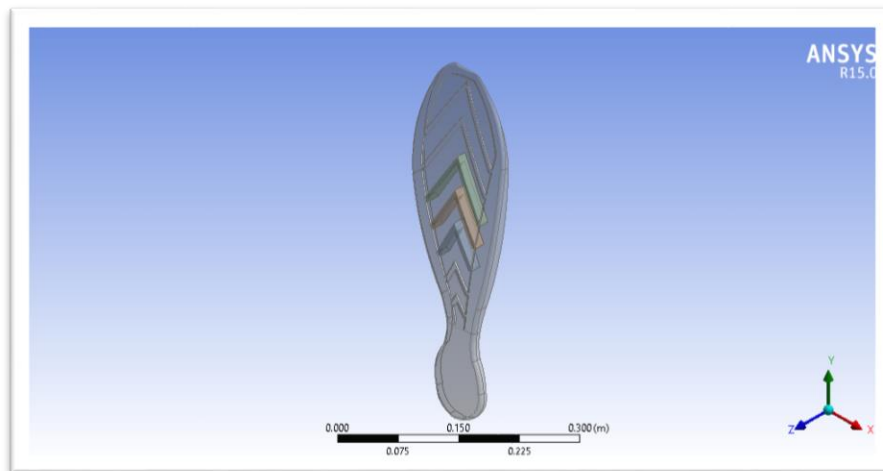


Fig. 4.1. Modelo 3D del prototipo importado a ANSYS.

ANSYS es un programa de elementos finitos que originalmente ofrece soluciones para resolver análisis estáticos lineales. Sucesivamente se han ido introduciendo módulos con los que este programa es capaz de resolver además problemas dinámicos no lineales. Los principales módulos de ANSYS son: Multiphysics, Mechanical, Structural, Professional, Design Space, Emag (simulaciones Electromagnéticas), Paramesh (mallas adaptativas), LSDYNA y Educational [1-2].

Es un programa de elementos finitos que da solución a procesos implícitos, es decir, resuelve sistemas estáticos/cuasi-estáticos (fuerzas aplicadas en grandes lapsos de tiempo) en los que el sistema se comporta de forma lineal. Se resuelve en una sola iteración, definida a partir de

intervalos grandes de tiempo, ya que las soluciones convergen fácilmente mostrando una gran estabilidad. De manera que utiliza pocos recursos computacionales [3].

4.2. Mallado del elemento estudiado

El mallado es la secciones que se utilizan para realizar un estudio de elemento finito, mientras más pequeñas sean las secciones de estudio, para que el resultado sea lo más acertado posible, a una prueba física. El tamaño de la malla que se utilizó para estandarizar el estudio de elemento finito fue de 2.2127×10^{-5} m (figura 4.2).

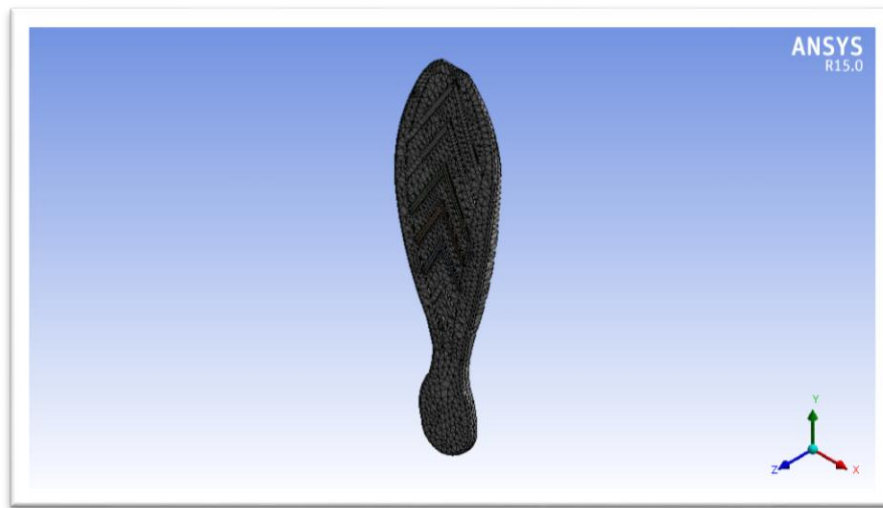


Fig. 4.2. Mallado del prototipo de fémur.

Existen numerosos métodos de generación de malla para elementos finitos [4]. Estos métodos se clasifican, según su grado de automatización, en manuales, semiautomáticos y automáticos [5]. En los métodos manuales, toda la información es provista manualmente, tanto la forma de los elementos como las coordenadas de los nodos, los atributos físicos, etc. Los métodos semiautomáticos aprovechan que el dominio a discretizar tiene formas geométricas sencillas para utilizar un modelo mixto, en el que se da información sobre algunos aspectos del mallado, y una rutina provee el resto. Por último, los métodos automáticos generan la malla sin requerir ninguna información adicional; únicamente necesitan conocer el contorno del dominio y las características físicas que debe tener en cuenta.

4.3. Condiciones de frontera

Se necesita de condiciones de frontera cuando se necesita realizar un estudio, en este caso de elemento finito, para conocer las variaciones que puede tener un elemento bajo diferentes especificaciones como lo son: fuerza, presión, modo de sujeción, torsión, etc., esto con la finalidad

de poder tener un resultado bajo condiciones mucho más específicas para la solución de problemas más complejos. En este estudio se tomó en cuenta dos condiciones de frontera la primera es la carga y la segunda es la sujeción del elemento. La carga aplicada (figura 4.3), es de -1000 N en el eje Y, este valor se tomó solo para comparar la resistencia del prototipo contra la de la placa. Por otro lado, el método de sujeción es en la base de las dos piezas, con el fin de que este permanezca fijo en la parte inferior y la compresión se realice en la parte superior del elemento.

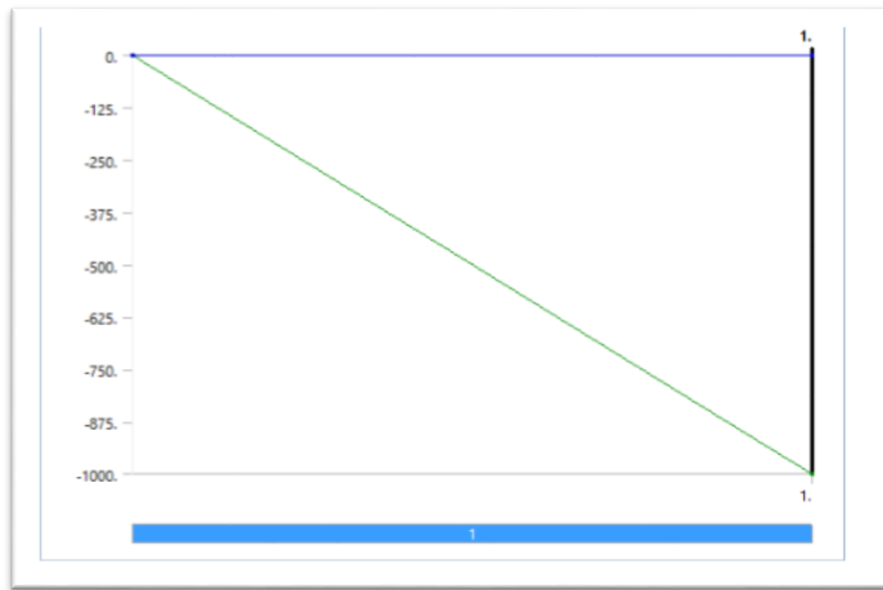


Fig. 4.3. Fuerza aplicada, 1000N en dirección negativa en el eje y.

4.4. Resultados obtenidos por medio del estudio de elemento finito

Por medio de este método, se observó el comportamiento de los elementos expuestos a las condiciones de frontera ya mencionadas. La deformación de estos elementos, tanto total como direccional en cada uno de los ejes (X, Y y Z), donde la deformación total es del conjunto de las combinaciones direccionales en un solo vector, que es el que resulta por la carga aplicada. La deformación total que tiene el fémur (figura 4.4), es de 2.7571×10^{-4} m.

El direccionamiento de la carga no varía, ya que este permanece constante durante todo el proceso de estudio y es perpendicular a la superficie en la que se aplica, el incremento tiempo-fuerza, recta con una pendiente de 45° , nos demuestra que no existe un cambio en la carga y que el incremento es lineal, (figura 4.3).

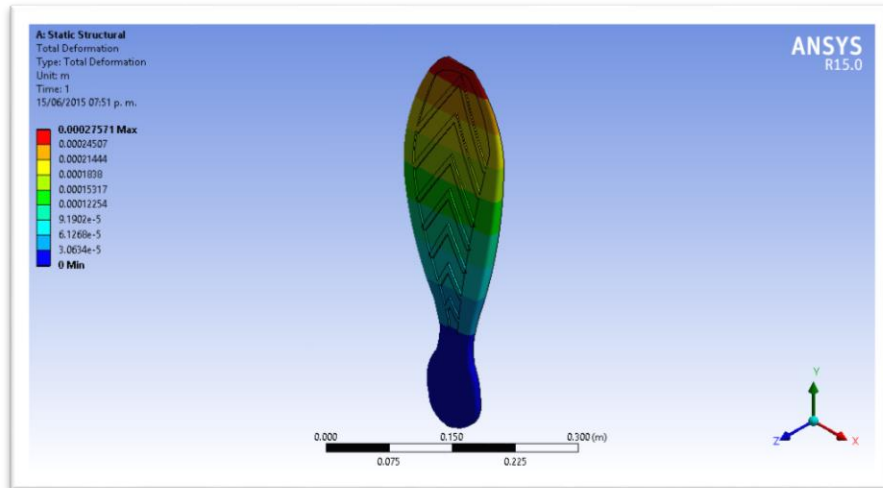


Fig. 4.4. Deformación total.

La deformación en x es completamente vertical (figura 4.5), en comparación a la deformación se concentra en la parte más delgada del fémur que es la parte superior (figura 4.10), la cual se encuentra de color rojo, por lo cual se podría considerar como la parte más propensa a una falla por la aplicación de cargas cíclicas o cargas diversas, como por ejemplo por el impacto del salto del grillo. La deformación que se obtuvo tiene un valor de 1.1753×10^{-5} m.

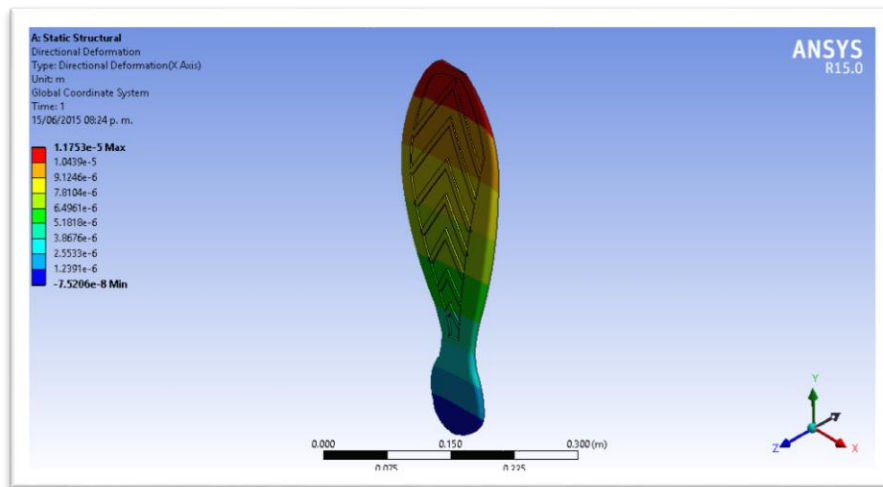


Fig. 4.5. Deformación direccional en x.

En la deformación en y se puede observar como la deformación se desvía hacia el lado izquierdo del elemento, esto se debe a que es donde hay más cantidad de material por lo tanto la deformación que sufre es mayor que en la que tiene menor cantidad de material, la deformación máxima es de 1.0334×10^{-5} m y la deformación mínima es de -9.8453×10^{-6} m, (figura 4.6).

La deformación que se genera en el eje z tiene un direccionamiento vertical (figura 4.7), concentrando la mayor cantidad de deformación en la parte más baja del fémur, por lo tanto en

esta parte es donde se concentra la deformación en Z. También se tiene que hacer mención que en esta parte del fémur se encuentra una articulación que continua con la pata y la distribución de la carga, esta parte no se tomó en cuenta ya que solo se estudia el comportamiento del puro fémur como elemento y no como un mecanismo. El valor máximo de la deformación del fémur es de 3.6179×10^{-7} m, y el valor mínimo es de -2.7532×10^{-4} m.

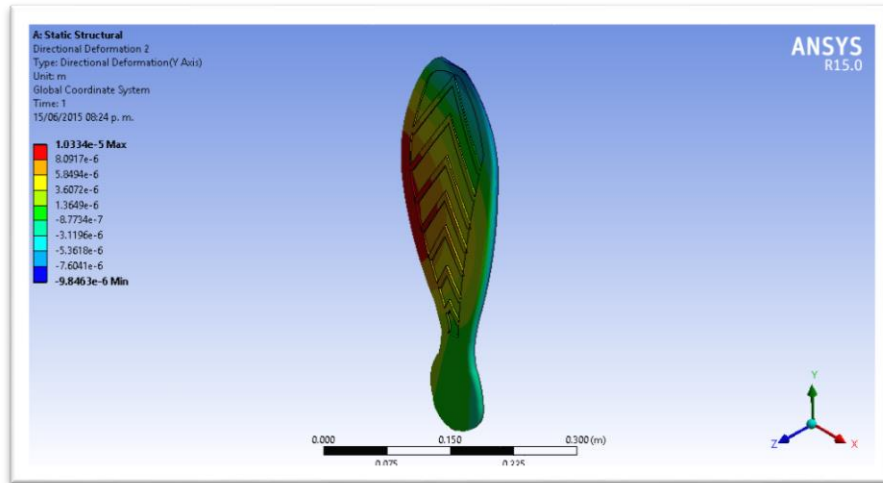


Fig. 4.6. Deformación direccional en y.

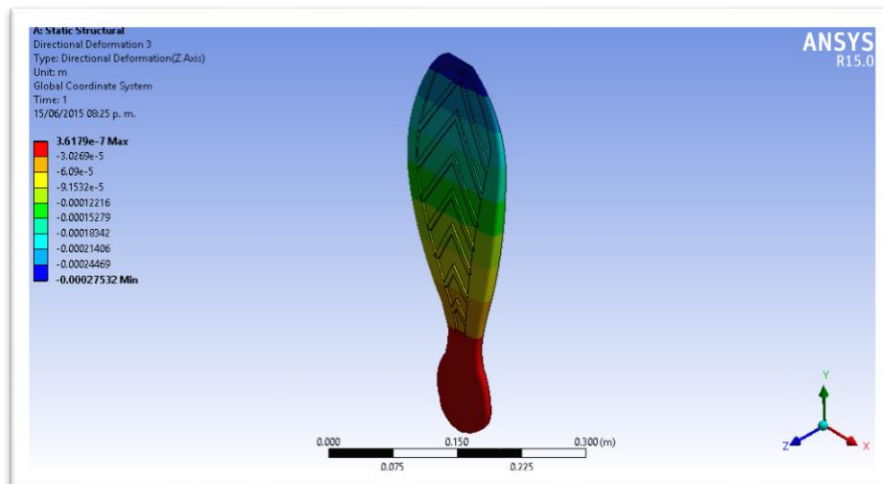


Fig. 4.7. Deformación direccional en z.

La tensión elástica, también conocida como la elongación, es de 8.4206×10^{-5} m/m (figura 4.8). En la elongación también existen valores mínimos y máximos para el cálculo de donde la pieza se estira más y donde se tiene a fallar por causa de una carga externa que es aplicada sobre este elemento. La elongación máxima que se genera por causa de la carga en el fémur es de 3.8542×10^{-5} m (figura 4.9). La elongación o tensión elástica mínima que se produce en el fémur (figura 4.10), es de 3.8841×10^{-8} m/m.

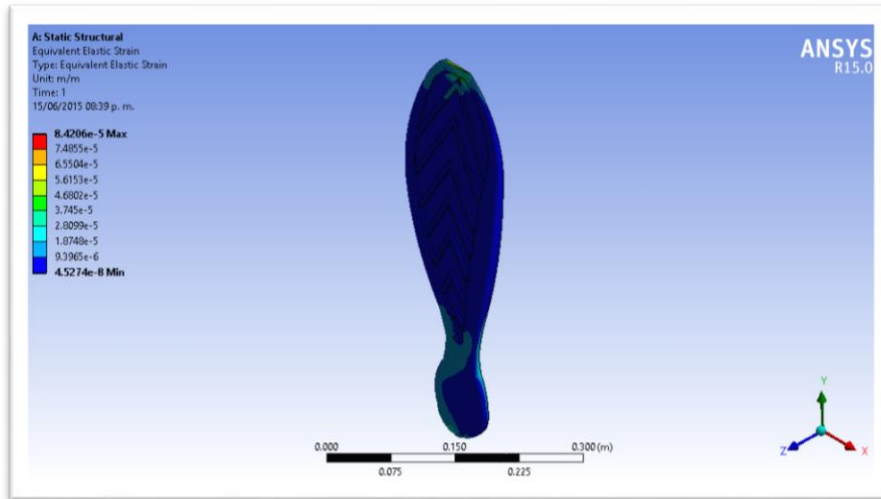


Fig. 4.8. Equivalente de von-Mises (tensión elástica).

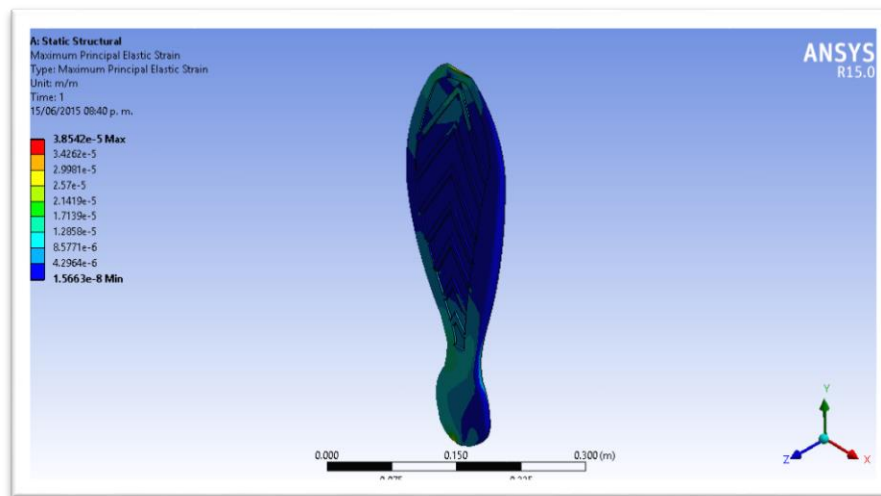


Fig. 4.9. Tensión elástica máxima.

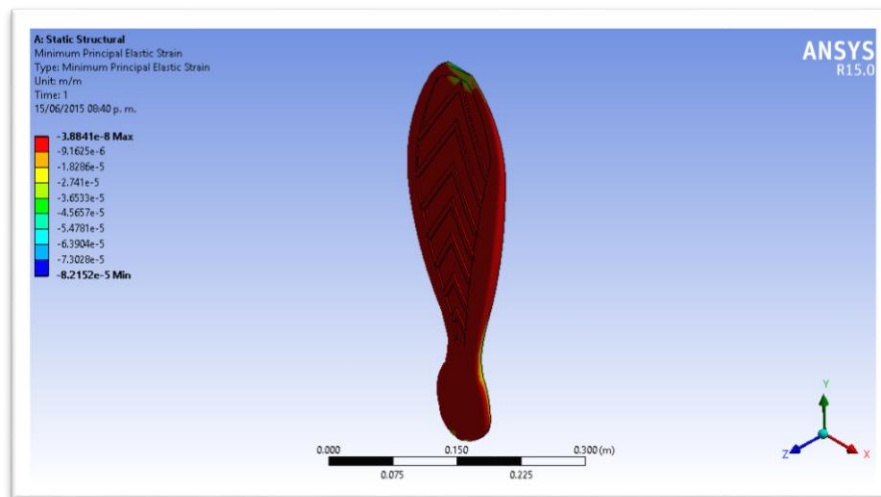


Fig. 4.10. Tensión elástica mínima.

Por último los valores que se obtuvieron dentro de este estudio fueron los del esfuerzo interno del elemento, que es la comparación de la resistencia que tiene el material de oponerse a la carga a la cual está siendo sometido, y esta comparación es entre la carga y la resistencia del material, como se comentó en el inicio de este capítulo. El esfuerzo en el cambio de sección y en la punta es donde más se concentra, que es donde se cuenta con menos material, el esfuerzo que resiste este elemento es de 1.4879×10^7 Pa (figura 4.11).

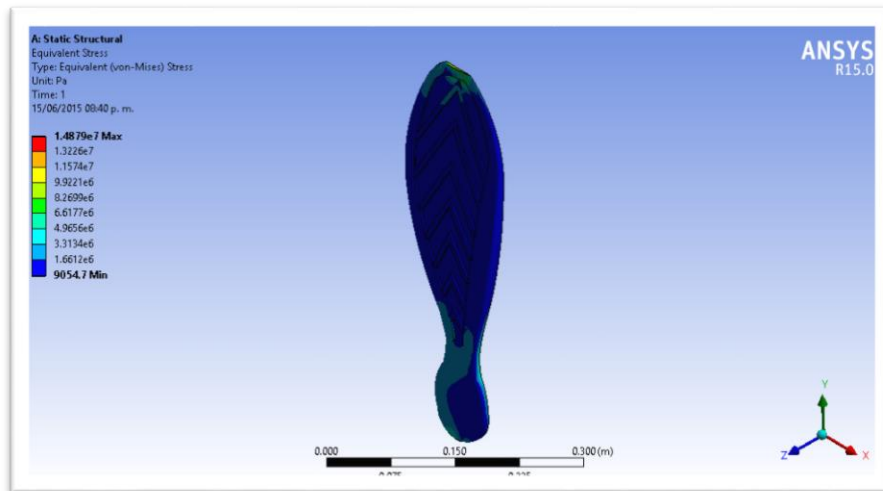


Fig. 4.11. Equivalente de von-Mises (esfuerzo).

La configuración que tiene el fémur dio como resultado 9.1479×10^6 Pa en la cual se puede observar que toda geometría cuenta con una gran distribución y el esfuerzo al que es sometido es mayor que la placa (figura 4.12).

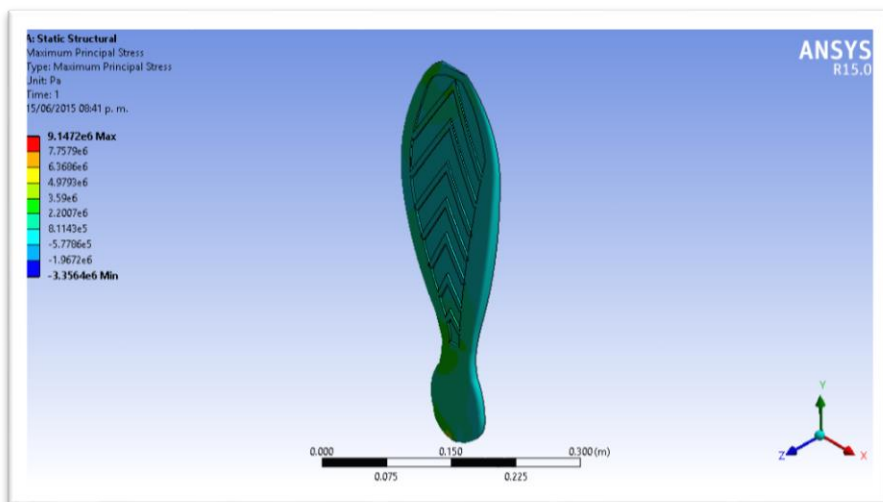


Fig. 4.12. Esfuerzo máximo.

El esfuerzo mínimo soportado por la distribución de esfuerzos en el fémur es de 2.0159×10^6 Pa (figura 4.13).

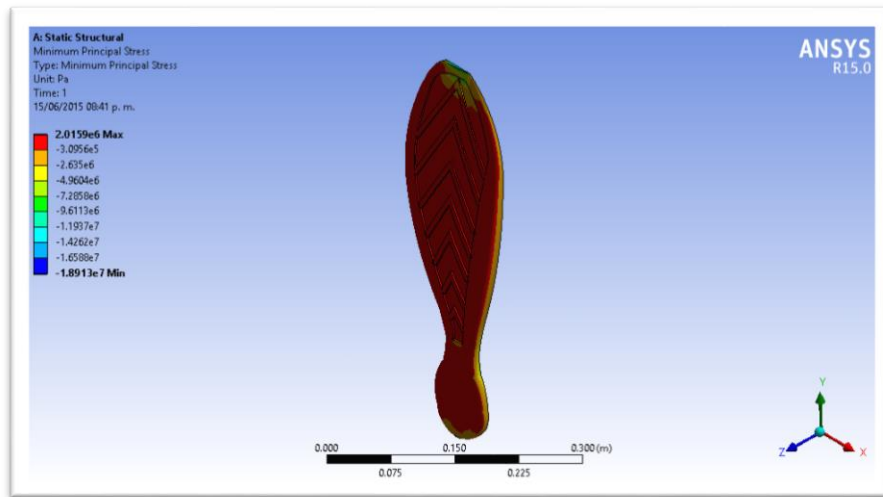


Fig. 4.13. Esfuerzo mínimo.

Tabla 4.1. Estudio estático estructural

Deformaciones [m]		Tensión elástica [m/m]		Distribución de esfuerzos [Pa]	
Eje x	1.1753×10^{-5}	Equivalente von-	8.4206×10^{-5}	Equivalente von-	1.4879×10^7
		Mises (elástico)		Mises (esfuerzo)	
Eje y	1.0334×10^{-5}	Tensión máxima	3.8542×10^{-5}	Esfuerzo máximo	9.1479×10^6
Eje z	3.6179×10^{-7}	Tensión mínima	-3.8841×10^{-8}	Esfuerzo mínimo	2.0159×10^6
Total	0.00027571				

4.5. Fabricación del prototipo del fémur

El proceso de fabricación que se llevó a cabo, se inició con la estructura, o esqueleto, para poder representar físicamente el modelo tridimensional, que se generó y explicó en capítulos anteriores. Se utilizó cartón para seccionar cada parte de la superficie, el cartón con el cual se realizaron las secciones es de (0.1875 pulg) dándonos la medida necesaria realizada en el modelado tridimensional.

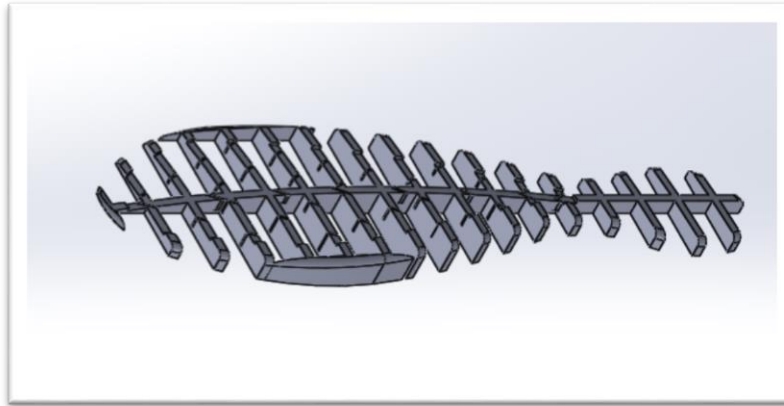


Fig. 4.14. Modelado de superficie del fémur por medio de estereotomía.

El modelo, para el cual se imprimieron las plantillas, tiene una escala de 1:26, por lo cual se tuvo que tener mucho cuidado en la elaboración de las impresiones para las secciones (fig. 4.14) ya que tienen que tener el mismo espesor, la misma separación, entre sección y sección, y tiene que tener la guía para la superficie que se quiere moldear. La fabricación del contorno que nos ayudó a fabricar la representación de la superficie deseada (figura 4.15b y 4.15b).



Fig. 4.15. Diferentes vista de la estereotomía fabricada para el prototipo a) vista isométrica y b) vista superior.

Lo siguiente que se realizó para continuar con la fabricación del prototipo fue crear la espuma que se utilizó para terminar la forma y terminar de unir las secciones (figuras 4.15). Este proceso constituye la mezcla de dos polímeros de diferente tipo, llamados polímero A y polímero B, que al momento de ser mezclados en cantidades iguales (50 gr c/u) se produce una reacción que hace que la mezcla se expanda abriendo sus poros y terminado en una forma sólida, la cual se puede manipular para el propósito deseado (figura 4.16).

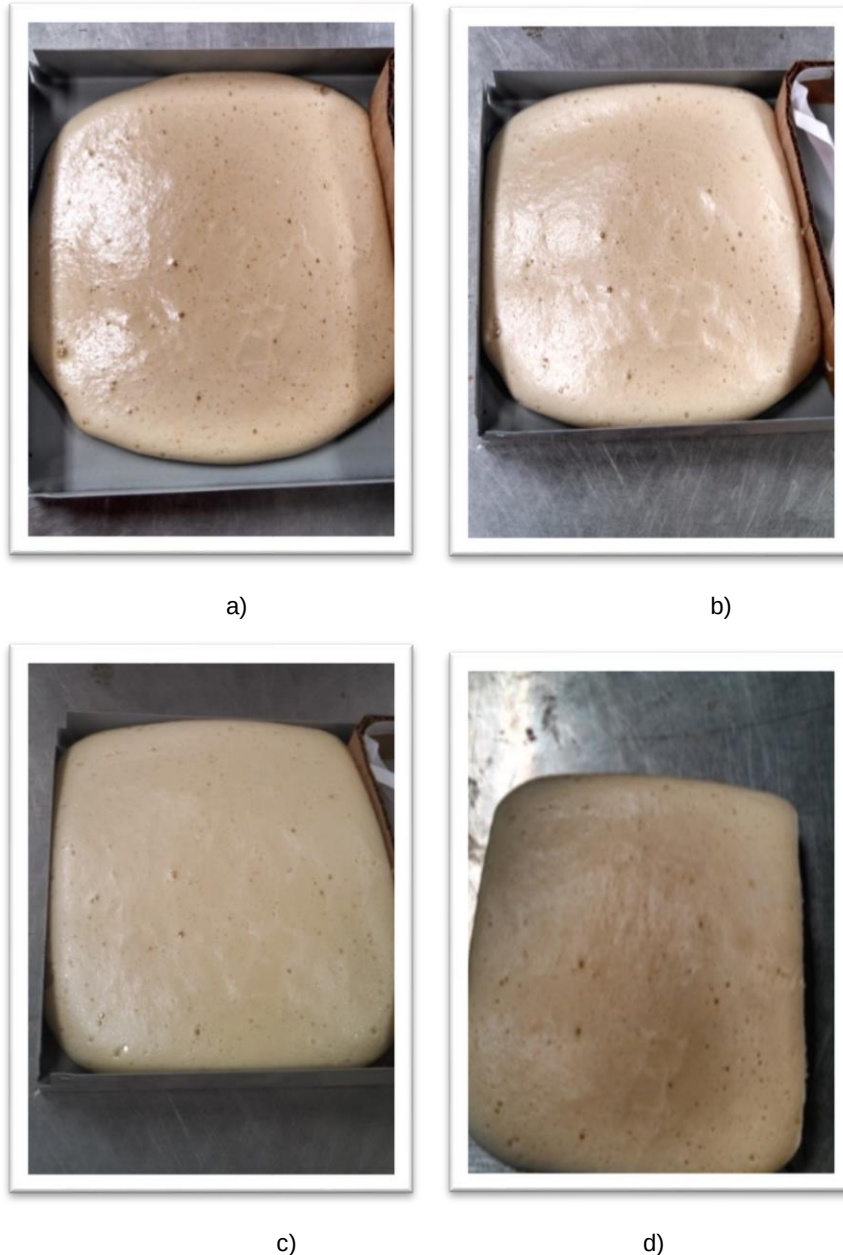


Fig. 4.16. Proceso de expansión del polímero, a) inicio de la expansión dentro del molde para su retención, b) expansión nivel medio, c) expansión final y secado de la mezcla y d) extracción de la espuma para su procesamiento.

Tendiendo el esqueleto y la espuma (fig. 4.17) continuamos con los cortes y la unión de estos dos elementos que se han fabricado para la obtención final del prototipo.



Fig. 4.17. Esqueleto de cartón y espuma.

El proceso de corte se realizó por medio de una seguita con arco, estos cortes no tenían que ser muy precisos simplemente que quedaran dentro de las secciones y que fueran de un tamaño prudente para realizar este ensamble sin afectar la estructura ya marcada (figura 4.18a). Las secciones cortadas se iban poniendo, sobre puestas, para ver si su corte fue el correcto o si se necesitaba rectificar esa pieza (figura 4.18b y 4.18c). Se tomó una tolerancia de ± 0.5 pulg, ya que esta tolerancia se encuentra dentro del rango de experimentación, para las pruebas posteriores que se realizaran y se detallaran a lo largo de este capítulo. Se dejó un exceso de material para su desbaste, el exceso fue aproximadamente de 0.75 pulg.



a) c) d)
Fig. 4.18. Ensamble de la espuma y del esqueleto, a) cortes realizados en la espuma, b) ensamble parcial sobre puesto y c) ensamble final sobre puesto.

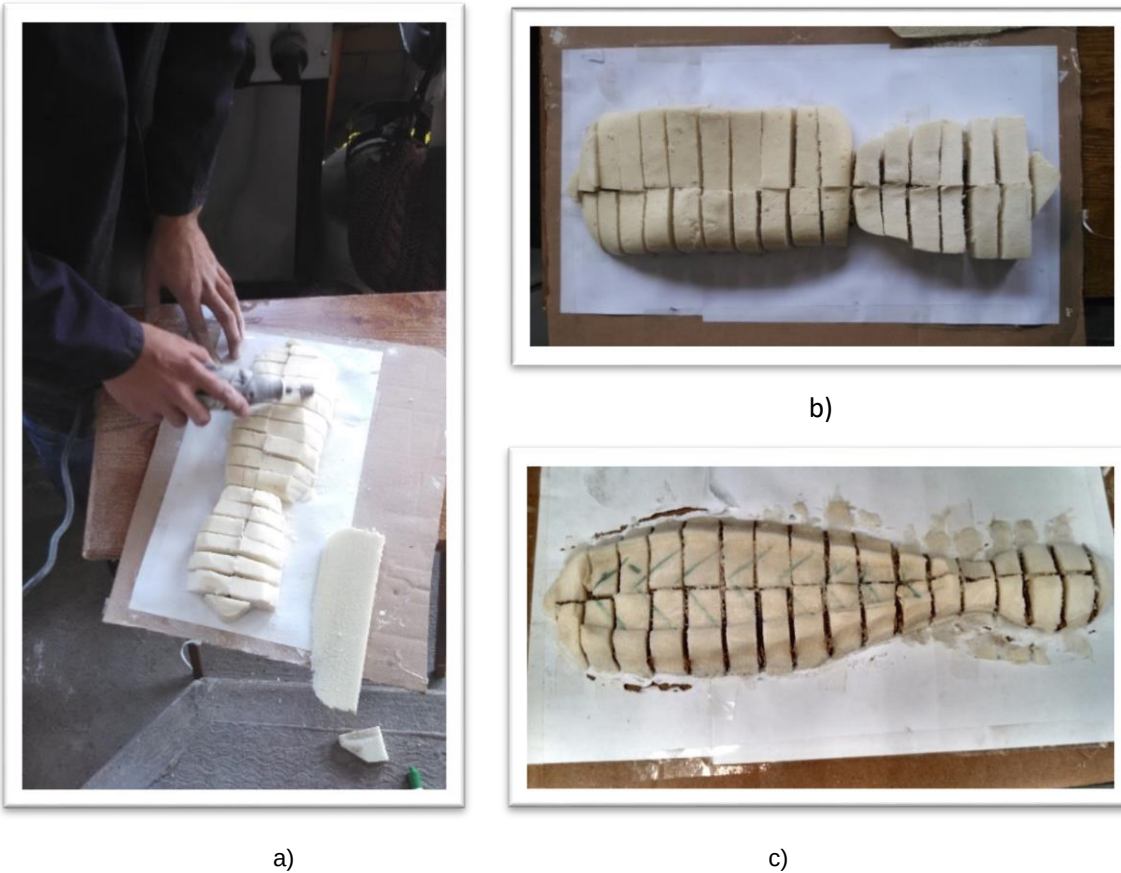


Fig. 4.19. Desbaste con un devastador manual a detalle (DREMEL) para acabado final de la espuma, a) desbaste inicial por procedimiento manual, b) pieza antes del desbaste y c) desbaste terminado.

El ensamble de la espuma con el cartón se realizó por medio de silicón, simplemente para fijar estos componentes, dentro de un mismo ensamble y que al momento de rectificarlo no se moviera de su posición (figura 4.19).

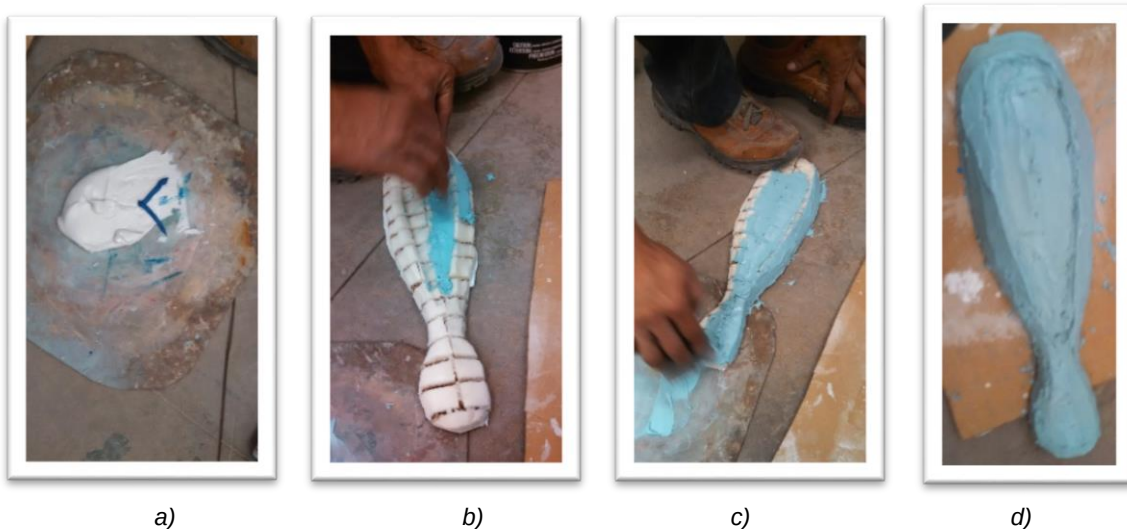


Fig. 4.20. Aplicación de pasta de rellenado automotriz en el modelo de espuma. a) Mezcla de pasta de rellenado automotriz catalizador, b) aplicación inicial de pasta de rellenado automotriz, c) aplicación final del pasta de rellenado automotriz y c) pieza completamente cubierta.

Para quitar el exceso de espuma dentro del modelo propuesto se necesitó de un devastador manual a detalle (marca DREMEL), con el cual se detalló el contorno del modelo. Se realizó un proceso de rectificado a la pieza con el DREMEL, para llegar a la forma deseada, la cual consta de las plantillas de cartón ya antes mencionadas (figura 4.20a y 4.20b).

Después de tener nuestra pieza ya modelada y rectificada, según las especificaciones mostradas se continuó con realizar un último acabado el cual consta de pasta de relleno automotriz (Bondo) y catalizador en partes de 50:1, aproximadamente, (figura 4.21a), para que este logre secar y tenga la consistencia requerida para poder manipular la superficie sin que esta se rompa o se desmorone.

Lo siguiente fue aplicar un acabado a la pieza al modelo (figura 4.20c), para tener una superficie final dentro detallada y poder terminar con el modelado de la pieza. La pieza que se obtuvo cumplió con las características que se propusieron desde el principio de esta investigación, teniendo como resultado tres diferentes resultados, el prototipo virtual (figura 4.21a), el prototipo físico (figura 4.21b) y las mediciones que se realizaron a los especímenes analizados (figura 4.21c).

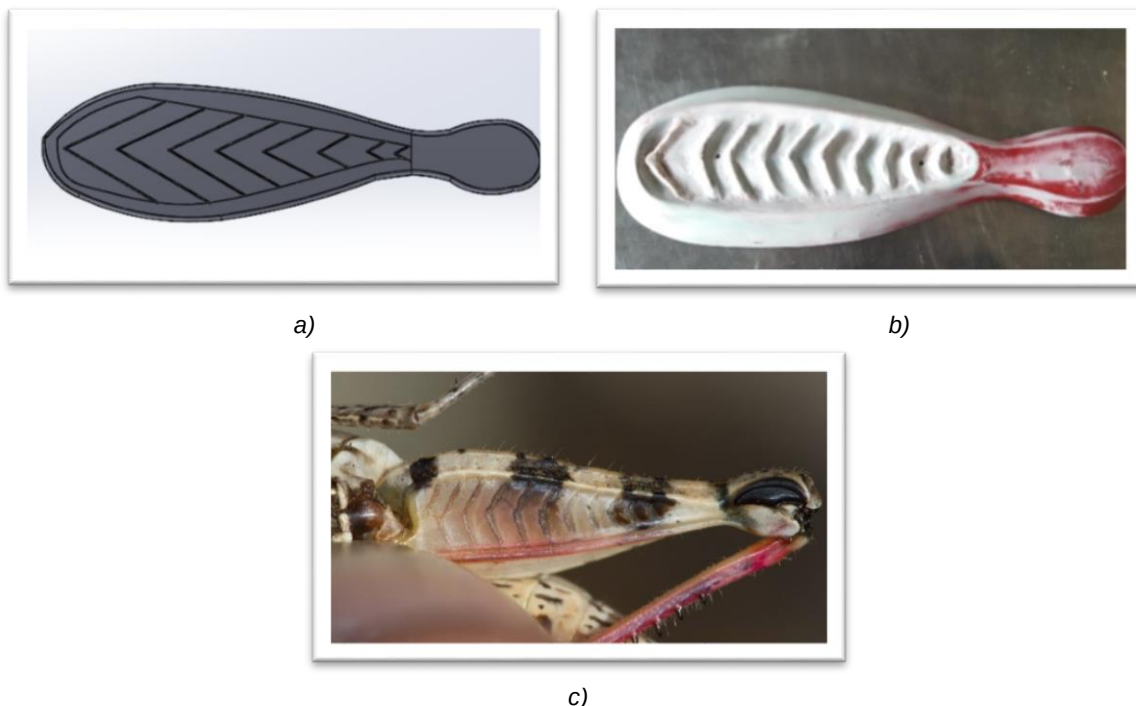
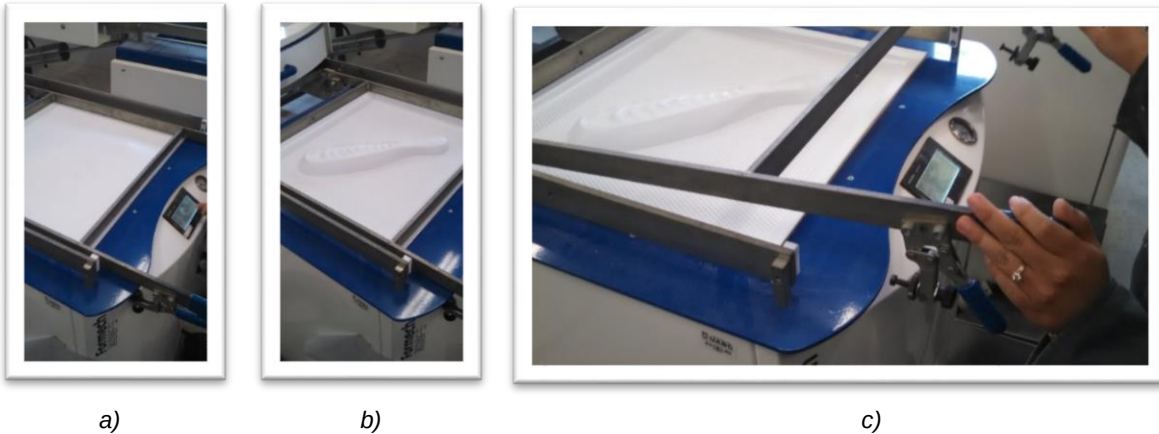


Fig. 4.21. Resultado de modelado y de mediciones realizadas a) modelado 3D b) fabricación de prototipo por estereotomía y c) imagen aumentada del fémur estudiado.

La necesidad de realizar este primer prototipo por estereotomía, fue por tener que realizar un molde en el cual se pueda realizar la infusión de la resina, para esto se realizó el proceso de

termoformado por medio de vacío para poder realizar este molde. El material a termoformar fue estireno de calibre 30 (.75 mm). La máquina termoformadora que se utilizó fue de marca Formech 508FS Pre-Stretch (figura 4.22a, 4.22b y 4.22c).

Por estos tres pasos se realiza el termoformado de una forma rápida y de calidad, ya que la pieza queda completamente marcada en el molde (figura 4.22a, 4.22b y 4.22c), donde se observa el comportamiento del estireno al aplicarle calor, presión y vacío para el moldeo de la pieza.



a) b) c)
Fig. 4.22. Proceso de termoformado a) colocación, calentamiento al estireno b) aplicación de vacío y c) liberación de la pieza.

El molde de estireno obtenido (figura 4.23), dejó enfriar para poder continuar con el proceso de manufactura detallado. Se le aplicó una capa de cera para que la resina no se adhiriera a los bordes del molde. Lo siguiente que se realizó fue la infusión de la resina, en capas de fibra de vidrio, lo cual da, como resultado, un material compuesto. Constituido por fibra de vidrio y estireno.



Fig. 4.23. Molde obtenido por medio del termoformado de estireno calibre 30.

El material compuesto propuesto consta de 6 capas de fibra de vidrio, dos de ellas es fibra de vidrio tejida y las otras dos de fibra de vidrio dispersa, (figura 4.24). Este proceso se lleva a cabo de acuerdo a la caracterización de material compuesto laminado con matriz polimérica para aplicación biomecánicas.



Fig. 4.24. Capas aplicadas en la fabricación del material compuesto.

El orden de las capas de fibra de vidrio, en orden ascendente son: una capa tejida, dos capas dispersas, una capa tejida y una tela para evitar la adición del material (figura 4.25). Se permitió la presencia de un excedente en las orillas del molde para que al momento de aplicar el vacío toda la pieza contenga este material.



Fig. 4.25. Aplicación de las capas de fibra de vidrio.

La prueba de vacío es necesaria que el sistema esté totalmente aislado para que no se generen burbujas por los cambios de presión y el aire que se puede quedar dentro del sistema, y la resina tenga la mejor compactación con la fibra de vidrio para que cada capa quede en su lugar y la infusión haya sido completada sin fugas de aire (figura 4.26).

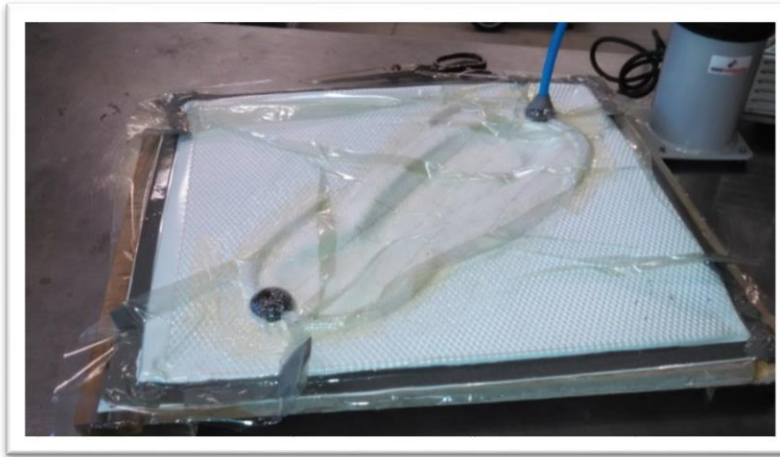


Fig. 4.26. Prueba de vacío al sistema de infusión.

El proceso de infusión se realizó cerrando un lado del sistema de tal manera que el aire sea expulsado totalmente del sistema. Cuando la presión en el manómetro es de -1 atm, el sistema se puede considerar como libre de aire en este momento se abre una valvula y se deja pasar la resina para que se compacte y distribuya por toda la pieza y se mezcle con las capas de fibra de vidrio, luego se cierran las dos valvulas se apaga la bomba y se deja que la resina solidifique entre 30 minutos y una hora dependiendo de la cantidad de catalizar implementado en la mezcla.



Fig. 4.27. Proceso de infusión y aplicación de la resina.

La resina utilizada fue 31424-00, con un catalizador líquido a proporción de 445 g de resina y 5g de catalizador. Este primer proceso de infusión (figura 4.27), que se desarrolló fue fallido ya que la resina no solidificó, además que el sistema no estaba totalmente cerrado y se perdió el vacío dentro del sistema lo cual no generó el vacío deseado, produciendo burbujas de aire y que las capas no se compactarán dentro de la pieza (figura 4.28). Se propuso un segundo método para

evitar las fugas dentro del sistema (figura 4.29), se consiguió un nuevo sistema de vacío el cual es más sencillo de implementar.

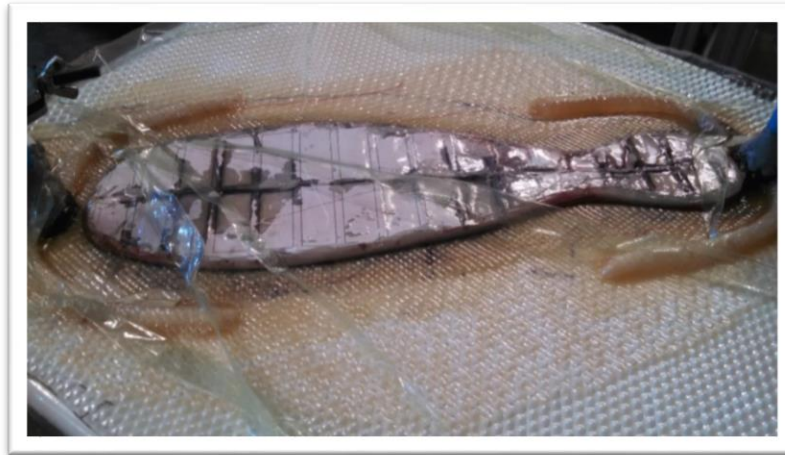


Fig. 4.28. Proceso de infusión terminado.



Fig. 4.29. Infusión con bolsa de nylon.

La segunda prueba que se realizó para el proceso de infusión, cabe destacar que con este sistema se tiene menos fugas y es mucho más rápida su aplicación y el proceso se agiliza mucho más (figura 4.44). Estos inconvenientes mencionados anteriormente se pueden mejorar tomando en cuenta adecuadas proporciones de los materiales y los instrumentos adecuados para la implementación de este proceso.

La composición del material con del prototipo que se fabricó no fueron las esperadas ya que el sistema de infusión no funciono esto sucedió por que la pieza tuvo problemas, no pudo catalizar por falta de un molde más grande y de mayor espesor, esto fue mayormente por la falta de tiempo y de equipo capaz de soportar las dimensiones del fémur.

Bibliografía Capítulo 4

- [1] Justdocument (2015). Guía de análisis estructural de ANSYS. Consultado el 25 de Enero del 2016. Diponible en: <http://www.justdocument.com/download/17353419363/guia-de-analisis-estructural-ansys/>
- [2] ANSYS (2015). *ANSYS Introduction*. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: www.ansys.com
- [3] Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4ª ed.). D. F., Mexico: Editorial Person education.
- [4] Ho-Le K. (1988) *Finite element mesh generation methods: a review and classification*. Computer-Aided Design.
- [5] George. P. L. (1991). *Automatic mesh generation. Application to finite element methods*. John Wiley and Sons; Masson.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

Capítulo 5 Conclusiones y trabajos futuros

A continuación se dará una descripción de todo lo que se desarrolló y los resultados obtenidos, así como los planes de continuidad que le quiere dar a este proyecto a corto plazo, para poder desarrollar mucho más este estudio y comenzar a ampliar el campo de aplicación y la tecnología que se necesita para aplicar este tipo de estudio.

5.1. Conclusiones

En este trabajo se realizó el diseño y la manufactura de un elemento mecánico basado en la geometría con la que cuenta el insecto *Calliptamus barbarus*, la cual es el elemento dentro del exoesqueleto del insecto que forma parte del sistema de amortiguamiento. El análisis del comportamiento mecánico de este elemento, junto con el diseño de un sistema para poder desarrollar este prototipo, se utilizó dentro de mecanismos con la finalidad de aplicarlo como un auxiliar a sistemas de rehabilitación y su uso en estructuras. De este trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. La geometría con la que cuenta el insecto de especie *Calliptamus barbarus* es resultado de la evolución que ha presentado esta especie. Las franjas con las que cuenta el fémur tienen un ángulo de 26° cada una respecto al eje neutro, con lo cual se genera una distribución de esfuerzos hacia la parte más ancha del exoesqueleto dándole esto un funcionamiento muy parecido al de una raqueta de tenis, en el cual las franjas tienen la función del hilo entre tejido de la raqueta, y la estructura de la raqueta es representada por el exoesqueleto del insecto.
2. Los modelos de análisis de elemento finito demuestran cómo se distribuye gran cantidad de la carga en la parte en la que se encuentran las franjas del fémur, sin embargo el impacto es mucho mayor en la parte más estrecha del fémur, generando una acumulación de esfuerzos muy grandes en estas zonas.
3. Los esfuerzos del modelo de falla de von Mises tienen un valor máximo de 1.5324×10^6 Pa en los resultados del análisis por elemento finito.
4. Dentro de este mismo argumento, el estudio por elemento finito fue elemental en este proceso, ya que se pudo ver su punto de ruptura y las partes en las que el fémur cuenta con mayor distribución de carga. Gracias a este estudio se pueden observar diferentes factores de carga y las diferentes formas en las que afecta al prototipo que se diseñó.
5. En cuanto al proceso de manufactura, que a su vez se divide en tres partes, estereotomía, termoformado e infusión de resina, la manufactura es uno de los procesos

más importantes dentro de la investigación realizada. Primero, El proceso de estereotomía es con el cual se realizara un modelo de espuma y cartón el cual contara con todas las características especificadas en el modelo tridimensional, hablando superficialmente, porque recordando la estereotomía es el modelado de superficie en base de secciones iguales. En segundo lugar se crea el molde, el cual es la parte negativa del modelo o la pieza realizada por estereotomía, en el cual se realizará, posteriormente, el proceso de infusión. Y por último se realiza el proceso de infusión dándonos como resultado un prototipo de fémur de tamaño humano con características únicas por ser de material compuesto.

6. Después de todo el desarrollo del estudio y la manufactura se continúa con la presentación y el desarrollo del documento como tal, para poder entregar los resultados obtenidos y las especificaciones deseadas. Este es el proceso de diseño y la metodología que se utilizó para poder realizar un prototipo tanto 3D como físico para el comprensión del comportamiento de la geometría del fémur.

5.2. Trabajos futuros

En base a las conclusiones se proponen las siguientes actividades:

- a) Realizar un análisis considerando la estructura interna del grillo para poder analizar más afondo el funcionamiento del fémur y el impacto que tiene dentro del exoesqueleto del insecto.
- b) Mejorar el proceso de infusión para lograr un proceso más rápido y con una mejor eficiencia.
- c) Continuar con el diseño del exoesqueleto a nivel mecanismo para la rehabilitación de pacientes con discapacidad en la movilidad de sus articulaciones y la ineficiencia de sus músculos.
- d) Optimizar el elemento que se analizó, basando el análisis en los puntos más críticos del elemento.
- e) Aplicar la metodología propuesta en este trabajo, para el desarrollo de piezas mecánicas de materiales compuestas.

Anexos

Anexo A Equipos y materiales para el desarrollo del proyecto

A .1 Equipo de perfilometría

El equipo que se utilizó para la toma de medidas superficiales fue el perfilómetro, el cual nos permite obtener el contorno de algún espécimen y al momento de girar la pieza y tener diferentes medidas superficiales tienes el área del elemento estudiado. En la fig. 2.1 se puede mostrar el equipo que se utilizó para la realización de estas mediciones.



Fig. A.1. CV2000 Sistema de perfilometría estacionario con columna manual para eficiente uso en el área de producción o en un laboratorio. [3]

El perfilómetro (CONTRACER CV-2000Series 218 de la marca MITUTOYO) cuenta con las siguientes características:

- El eje Z está equipado con una escala digital en la unidad de detección. Esto le da una gama más amplia de medición y con una resolución más alta. [3]
- Software FORMTRACEPAK como software de análisis de contorno, ofrece soporte total para el sistema de medición, el análisis del contorno, el contorno de tolerancias y la creación de informes de inspección [4].

En la tabla A..1 se muestran las especificaciones detalladas del equipo que se utilizó para realizar la perfilometría mecánica del fémur del grillo.

Tabla A.1. Especificaciones CONTRACER CV 2000 [6]

Numero de Modelo		CV-1000	. CV-2000
Rango de Medición	Eje X	50mm	100mm
	Eje Z	25mm	40mm
Exactitud	Eje X	3.5+2L /100 μm L Medición de longitud en mm	
	Eje Z	± 3.5+ 4H /25 μm H Medición de la altura (mm) desde un nivel de posición (menor que ±12.5mm)	± 3.5+4H/25 μm H Medición de la altura (mm) desde un nivel de posición (menor que ±20.0mm)
Linealidad transversal (con el eje X horizontal)		3.5μm/50mm	3.5μm/100mm
Precisión en el eje Z		0.4μm	0.5μm
Velocidad de medición	Medición	0.2/0.5mm/s	
	Movimiento	0.2/1.0mm/s y manual	
Fuerza de medición		10`30mN (en horizontal usar el brazo de medición)	
Limite de angulo		Arriba (depende de la superficie)F77° Abajo (depende de la superficie)F87°	
Dirección de Medición		Unidad de accionamiento	
Dirección de la aguja en la medición		Abajo	
Operación del eje X Columna	Opciones	Automatico / Control manual	
		Soporte de columna manual 600×450mm	
Medidas de la base (W×D×H)			
Material de la base			
Dimensicones externas (W×D×H)			
Peso del equipo			

A-2. Equipo de comparador óptico

Este es un Sistema de medición de vídeo para la medición e inspección de precisión, de muy alta calidad, es el mismo concepto que un microscopio pero con menos aumento y más detalle, además de contar con cambios de contraste para lograr ver mejor los perfiles y compararlos con los que se tienen en búsqueda. [5] Cuenta con un software, que permite realizar operaciones esenciales como medir distancias, en medidas reales o medir ángulos entre secciones, además que permite realizar trazos sobre la imagen observada. Entre sus principales características están:

- Sistemas de medición de vídeo de 2 ejes, ideal para la medición de características 2-D piezas de pequeñas e intrincadas
- Opción de tecnologías de medición de vídeo y microscopio combinados
- Cambiar sin problemas entre el vídeo y el microscopio medición
- Microscopio óptico ergonómico patentado ofrece alta
- Resolución inspección visual
- La inversión de capital bajo, los sistemas de medición de alta precisión

Para más detalle ver tabla A-2. En la figura A-2 se muestra el conjunto del equipo que se utilizó, a continuación se compararen y enlazaran los resultados durante el proceso de metrología.

Tabla A-2. Especificaciones del comparador óptico (Swift-Duo V2.0). [5]

Especificaciones técnicas	
Video cámara	Alta resolución a color. Cuenta con una cámara CCD
Opciones de aumento	10x, 20x, 50x, 100x
Estación de medición	Estación para medidas de precisión con corrección de error (NLEC Non-Linear Error Correction) calibración estándar.
Rango de medición	150mmx200mm (10kg máximos de carga)
Ajuste de altura	100mm de altura ajustable
Resolución	X=1 μ m y=1 μ m
Dimensiones	420mmx430mmx480mm
Peso	Swift-Duo V2.0 4kg



Fig. A.2. Comparador óptico Swift-Duo V2.0. [5]

A-3 Descripción del equipo de termoformado

La máquina para termoformado de Formech 508FS Pre-Stretch permite al usuario poder soplar una burbuja de aire en el material caliente, que evita el adelgazamiento de material cuando la formación de formas es profunda. Cuanta también con auto nivel de Bombas de aire bajo el plástico calentado para mantener la distancia entre el calentador y la hoja, mientras que proporciona al usuario una indicación audible de que el material esta listos para formar. Intuitiva pantalla táctil, impulsada gráficamente por el control de función de memoria hace que la termoformadora 508FS sea muy fácil de usar, con potentes capacidades de formación proporcionando una amplia versatilidad a cualquier tipo de proyecto. [2]



Fig. A-3. Máquina utilizada para el proceso de termoformado FORMECH 508FS.

En la figura A -3 se puede observar la marca y el modelo de la maquina termofodara con la que se realizó el proceso de moldeo de plástico. En la tabla A-3 se muestran las especificaciones más detallada de esta máquina utilizada para el proceso de termoformado.

Tabla A -3. Especificaciones técnicas de Formech 508FS y continuación

Area de Formado	Tamaño de hoja (mm/pulgadas)	Profundidad maxima de formado	Espesor maximo de material	Zonas de Calentamiento	Tipo de Calentador	
482x432mm/19x17"	508x457mm/20x18"	290mm/11.5"	*6mm/0.25nn"	4	Quartz	
Espesor	Altura	Profundidad	Peso	Fuente de poder	Consume de poder	Requerimientos de aire
730mm/28.7"	1200mm/47.25"	1400mm/55.1"	125kg/264lbs	208-240V/20A	3.5kW	80PSI/5bar

A-4 Descripción del equipo de infusión de resina

El equipo auge se utilizó para la elaboración del proceso de infusión fue adquirido por medio de internet, la marca a la cual se consultó y se realizó la compra del equipo es Easy Composite, la cual fue seleccionada por su calidad y por su fácil adquisición, además del trabajo en proyectos anteriores con esta marca.

A -5 Bomba de vacío

Diseñada para ofrecer los niveles muy altos de vacío (99.995%) para los períodos prolongados a menudo se requieren en los procesos de materiales compuestos, esta bomba de vacío (imagen #) compacta ofrece años de servicio confiable, incluso en incluso el taller de compuestos de mayor actividad.



Fig. A-4. Bomba de vacío entregada por el fabricante. [1]

En la figura A -4, se puede observar una bomba similar a la que se utilizó para realizar el proceso de infusión. A continuación en la tabla 3.4 se muestran las especificaciones detalladas del equipo mencionado.

Tabla A -4. Especificaciones de bomba de vacío (ECVP425)

Especificaciones:	Model ECVP425
Desplazamiento de aire	42.5l/m
Voltage	110/220v ~50/60hz
Potencia	185w
Peso	8Kg
Dimensiones	275mm x 120mm x 220mm

Esta bomba es ideal para casi cualquier proceso de vacío compuestos, incluyendo:

- Bolsas de vacío
- Infusión de resina
- Moldeo por Transferencia de Resina (RTM)
- Vacío presionando (paneles sándwich)
- Recubrimiento
- Resinas de desgasificación al vacío y siliconas

A-6 Resina epoxica para infusión.-

Esta resina epoxica de alto rendimiento ha sido específicamente formulado para su uso en materiales compuestos de resina de infusión de producción.

Tabla A -5. Propiedades y especificaciones de resina para infusión.

Propiedad	Unidades	Resina	Endurecedor	Conjunto
Material	-	Resina epoxídica	Formulado Polyamine	-
Apariencia	-	Liquido transparente	Liquido transparente	Liquido transparente
Viscosidad (20°C)	MpA.s	500-800	10-20	200-450
Densidad	g/cm2	01.08 a01.18	01.07 a01.13	1.12 a 1.18

En la tabla A -5 se puede observar las diferentes resinas que se utilizan para la infusión y las especificaciones principales de este producto, por otro lado en la tabla A -6 se muestra el tiempo que tarda en endurecer la resina, de manera general dependiendo de la temperatura a la que se encuentra.

Tabla A-6. Trabajo y tiempos de curado.

	25°C	60°C	100°C	Tiempo de curación total a 25°C
Tiempo de curado	24hrs	6hrs	3hrs	7 días

Como resina de infusión es ultra baja viscosidad asegurando que es capaz de infundir rápidamente a través de una serie de refuerzos. Su excelente resistencia mecánica hace que sea ideal para su uso con refuerzos de alto rendimiento.

Tabla A 7. Propiedades mecánicas de la resina en estado sólido.

Dureza (shore D)	Resistencia a la tracción (MPa)	Alargamiento a la rotura	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de flexión (MPa)	Distorsión de calor (°C)
80-85	55,0-65,0	5.0-8.0	100-110	2500-2800	100-110



Fig. A -5. Formula de epóxido y acelerador recomendada por el fabricante. [1]

A -7 Manguera de Vacío PVC

La manguera de PVC es transparente, de uso general para su uso en una amplia gama de aplicaciones de vacío. Esta manguera es adecuada para su uso como las de alimentación y de vacío líneas de resina de conexión para la infusión de resina (donde es probable que se ensucian con la resina del tubo y ser desechables) y también las aplicaciones de bolsa de vacío que no serán sometidos a altas temperaturas. Esta manguera de aspiración de PVC debe estar conectada a través de bolsa de conectores, bombas de vacío y otros equipos mediante un conector de cola de la manguera de 6mm. Esta manguera de PVC se suavizará considerablemente y puede colapsar a altas temperaturas por lo que esta manguera no debe ser utilizada para las conexiones de vacío, donde la manguera de tubo se somete a temperaturas superiores a 50 ° C.



Fig. A -6. Tubería de PVC transparente para aspiración de resina. [1]

En la figura 3.6 se muestra lo que es la tubería que se utilizó para el proceso de infusión. Esta manguera es prácticamente desechable ya que la resina introducida en la tubería se solidifica y es muy difícil quitar los residuos que quedan internamente de este tubo.

A -8 Película de embolsado de vacío

De vacío de alto rendimiento película de bolsa en un tubo aplastado adecuado para su uso en todas las aplicaciones de materiales compuestos de bolsa de vacío, incluyendo bolsas de vacío convencional, infusión de resina y preimpregnado fabrican partes. Soportando un temperatura de 204°C y una resistencia la tracción de 55 MPa.



Fig. A -7. Película transparente para el embolsado en vacío. [1]

La configuración tubo plano puesto (LFT siglas en inglés) significa que la película es esencialmente un tubo gigante de embolsado significado película que la mitad de las costuras para muchas aplicaciones ya están allí, reduciendo la cantidad de cinta de goma necesario y reduciendo la probabilidad de fugas. La película es de 1.52 m de ancho y con los dos lados del tubo da como resultado 3.04sqm por metro lineal ordenada. Esta película de bolsa de alto rendimiento es resistente a la rotura y adecuado para su uso en las temperaturas de operación de hasta 204 ° C.

A -9 Goma para bolsas de vacío sellador de cinta (alta temperatura)

De vacío de alto rendimiento goma de ensacado cinta selladora (también conocido como tachuela-cinta o cinta de presión) que se utiliza para crear sellos fuertes y fiables entre las piezas de película de bolsa de vacío. Esta cinta de alta temperatura de ensacado es adecuado para su uso a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas de hasta 150 ° C.



Fig. A-8. Adhesivo en forma de cinta selladora de alta temperatura. [1]

A -10 Cascaron de vacío (Peel Ply)

Cáscara de embolsado de vacío de capas para su uso en una amplia gama de materiales compuestos aplicaciones de embolsado de vacío. Peel ply se utiliza a menudo como la primera barrera entre el compuesto y el resto de las de bolsas de vacío. Está cubierta provisional no se unirá al material compuesto y puede ser eliminado después de que el producto ha curado para proporcionar una superficie con textura perfecta realizando la unión. Soportando una temperatura de 190°C con un peso nominal de 88 g/m².



Fig. A -9. Comúnmente llamado "Peel Ply", es desechable después del curado. [1]

A -11 Malla de infusión.

Se utiliza en proyectos de infusión de resina para distribuir la resina a través de y en todo el laminado. La malla es un patrón "Criss Cross" de plástico flexible que las instalaciones de la resina de flujo, lo que garantiza que la resina alcanza todas las partes de la pieza. Malla de

infusión también se puede utilizar selectivamente para aumentar el flujo de resina a ciertas áreas del molde y aumentar la velocidad con la que infunde el proyecto. Malla de infusión se puede utilizar en múltiples capas donde se requiere incluso mayor flujo de resina.



Fig. A -10. Malla de infusión para la distribución de resina. [1]

Al igual que la mayoría de los otros elementos de la bolsa de vacío o infusión de resina la malla de infusión 'pila' no se puede volver a utilizar una vez que la resina ha volado a través de él y por lo tanto debe considerarse un consumible desechable del proceso. Esta malla media es ideal para cualquier cosa, desde una pequeña parte, hasta grandes piezas como paneles de vehículos completos o una pala de un aerogenerador.

A -12 Malla mejorada de infusión de resina

Es increíblemente adaptable, desarrollado específicamente para proyectos de infusión más pequeñas o más complejas formas de moldes donde mallas plásticas tradicionales pueden ser difíciles de cumplir en moldes redondos o contorneados curvas cerradas. Ha sido diseñado para permitir la máxima estiramiento y capacidad de conformación, mientras que al mismo tiempo se mantiene el flujo de resina excelente a través de la malla. De hecho, a pesar de su naturaleza blanda, conforme la tasa de flujo de la resina de es casi exactamente el mismo que nuestra plástico rígido estándar malla de Infusión. La malla de infusión también se puede utilizar selectivamente para aumentar el flujo de resina a ciertas áreas del molde y aumentar la velocidad con la que infunde el proyecto. Malla de infusión se puede utilizar en múltiples capas donde se requiere incluso mayor flujo de resina. Al igual que la mayoría de los otros elementos de la bolsa de vacío o infusión de resina de malla de infusión 'pila' no se puede volver a utilizar una vez que

la resina ha volado a través de él y por lo tanto debe considerarse un consumible desechable del proceso.

Tabla A -8. *Propiedades de la malla para la infusión de Polipropileno.*

Material	Polipropileno
Construcción Warp	Tejido de punto
Ancho	1,4 m (55 ")
Peso	140 g / m ³

En la imagen A -11 se observa la malla de infusión la cual tiene una textura parecida a la ceda y un tejido entre cruzado, que haya a la infusión en sí.



Fig. A -11. Malla de infusión para mejorar la distribución de resina. [1]

A -13 Espiral de infusión

Es un tubo de plástico enrollado en espiral que permite el flujo fácil de resina desde el tubo de alimentación de resina hasta todo el alrededor de un proyecto. El espiral de infusión se coloca normalmente debajo de la línea de alimentación que dirige el flujo de resina en las otras esquinas de la parte.



Fig. A -12. Tubería en forma de espiral utilizada para permitir el mayor flujo de resina. [1]

Este flujo de medio de caracol tiene un diámetro de 5 mm y es adecuado para pequeños y medianos proyectos de infusión (hasta el tamaño de un capó de vehículo / campana) o para su uso en proyectos de gran envergadura que se requiere una distribución de resina más lento.

Al igual que la mayoría de los otros elementos de la malla de infusión proceso de infusión de resina no pueden ser reutilizados una vez que la resina ha volado a través de él y por lo tanto deben considerarse un consumible desechable del proceso.

A-14 Conector de silicona

Es un conector reutilizable diseñado específicamente para el proceso de infusión de resina. El conector se encuentra dentro de la bolsa de vacío y admite la manguera de la aspiradora o espiral de infusión de resina. En la parte inferior del conector hay un distribuidor de 4 canales que asegura un buen conducto de aire para la línea de vacío en el proyecto o, alternativamente, un buen flujo de resina en la espiral de infusión. En la imagen A-13 se observa las dos partes que conforman este dispositivo el cual es de vital importancia para la correcta distribución de vacío dentro del sistema de moldeo, el cual tiene que estar completamente sellado y sin fugas, para de este modo evitar pérdidas en la presión dentro del sistema.



Fig. A -13. Conector de silicona para el proceso de infusión de resina.[1]

A -15 Líneas de amarre

De acero inoxidable para la Infusión de resina las líneas de amarre utiliza para sujetar las mangueras de vacío y las mangueras de alimentación de resina cerradas durante ciertas partes de la infusión de resina o de vacío procesos de ensacado.



Fig. A -14. Amarre de acero inoxidable para las líneas de infusión de resina.[1]

A-16 Depósito de infusión de resina

El depósito de recogida se fabrica a partir de un tubo de 2 mm de pared de acero y base, con recubrimiento en polvo para un acabado resistente a prueba de químicos. Cuenta con una tapa cortada a láser de 10 mm de acrílico transparente (para permitir una buena visibilidad en la olla), patas de goma anti-derrapante, un sello positivo de caucho de silicona a medida de alta resistencia, medidor de vacío y la línea de resina hermético y las conexiones de las líneas de

vacío. El depósito de recogida está diseñado para aceptar moldes de papel que se pueden sustituir con facilidad para evitar el ensuciamiento del interior de la olla.



Fig. A -15. Depósito de recogida de resina con indicadores de vacío.[1]

A-17 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es uno los refuerzos más utilizados en la fabricación de materiales compuestos en aplicaciones industriales, debido a su alta disponibilidad, bajo costo y sus buenas propiedades mecánicas. En la figura A -16 se puede observar el tejido con el que cuenta la fibra de vidrio, que es la forma característica por la cual se distingue la fibra de vidrio.



Fig. A -16. Tejido de fibra de vidrio. [1]

Estos materiales presentan una serie de características que se presentan a continuación y que les permite ser ampliamente utilizadas:

- La resistencia mecánica específica es alta, incluso mayor que la del acero.

- Es un buen aislante eléctrico incluso en espesores delgados, pues posee una buena permeabilidad eléctrica y magnética.
- Es un material cuyos componentes son minerales y es incombustible por naturaleza, por lo que no propaga la llama y no produce calor, humos y/o toxicidad. • Presenta un bajo coeficiente de dilatación térmica, por consiguiente tiene una alta estabilidad dimensional y es poco sensible a los cambios térmicos e higrométricos.
- Presenta una buena disposición a recibir diversos ensimajes, creando un puente de unión entre las fibras y la matriz, que les permite asociarse a un alto número de resinas sintéticas y matrices minerales.
- Es inerte a la acción biológica, por lo tanto, no sufre alteraciones y no se pudre.
- Presenta una baja conductividad térmica, lo que le permite ser muy utilizada en la construcción, pues posibilita prescindir de los puentes térmicos y por consiguiente un ahorro considerable de calefacción.
- Presenta estabilidad química, por lo que al fabricar materiales compuestos con una resina apropiada, se pueden obtener productos que sean resistentes a agentes químicos.

De los diversos tipos de fibra de vidrio que se encuentran en el mercado (E, A, C, R o S y D), la fibra de vidrio “E” es la más utilizada en la fabricación de materiales compuesto, abarcando un 90% de mercado, pues ofrece la suficiente resistencia mecánica a un bajo precio. En la Tabla 3.9 se detalla la composición química de la mencionada fibra. [7]

Tabla A-9. *Composición química de la fibra de vidrio [7]*

Constituyente	% en peso
Sílice (SiO ₂)	53-54
Alúmina (Al ₂ O ₃)	14-15,5
Cal (CaO)	20-24
Óxido de magnesio (MgO)	
Óxido de boro (B ₂ O ₃)	6,5-9
Fluor (F)	0-0,7
Óxido de sodio (Na ₂ O)	<1
Óxido de circonio (ZrO ₂)	

Bibliografía Anexos A

[1] Easy Compitaves (2013). Materials. Equipment and Supplies for Advanced Composites.

Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.easycomposites.co.uk/>

[2] Formech (2016). Catálogo de Formech modelo 508DT y 508FS. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://formech.com/wp-content/uploads/2014/10/Spec-sheet-508DTFS.pdf>

[3] Mitutoyo (2005). Mitutoyo manual de especificaciones, pp. 550, 551 y 552. Consultado el 26 de Enero del 2016. Disponible en: www.mitutoyo.com.mx/Catalogo%20Digital/catalogo.../05_calipers.pdf

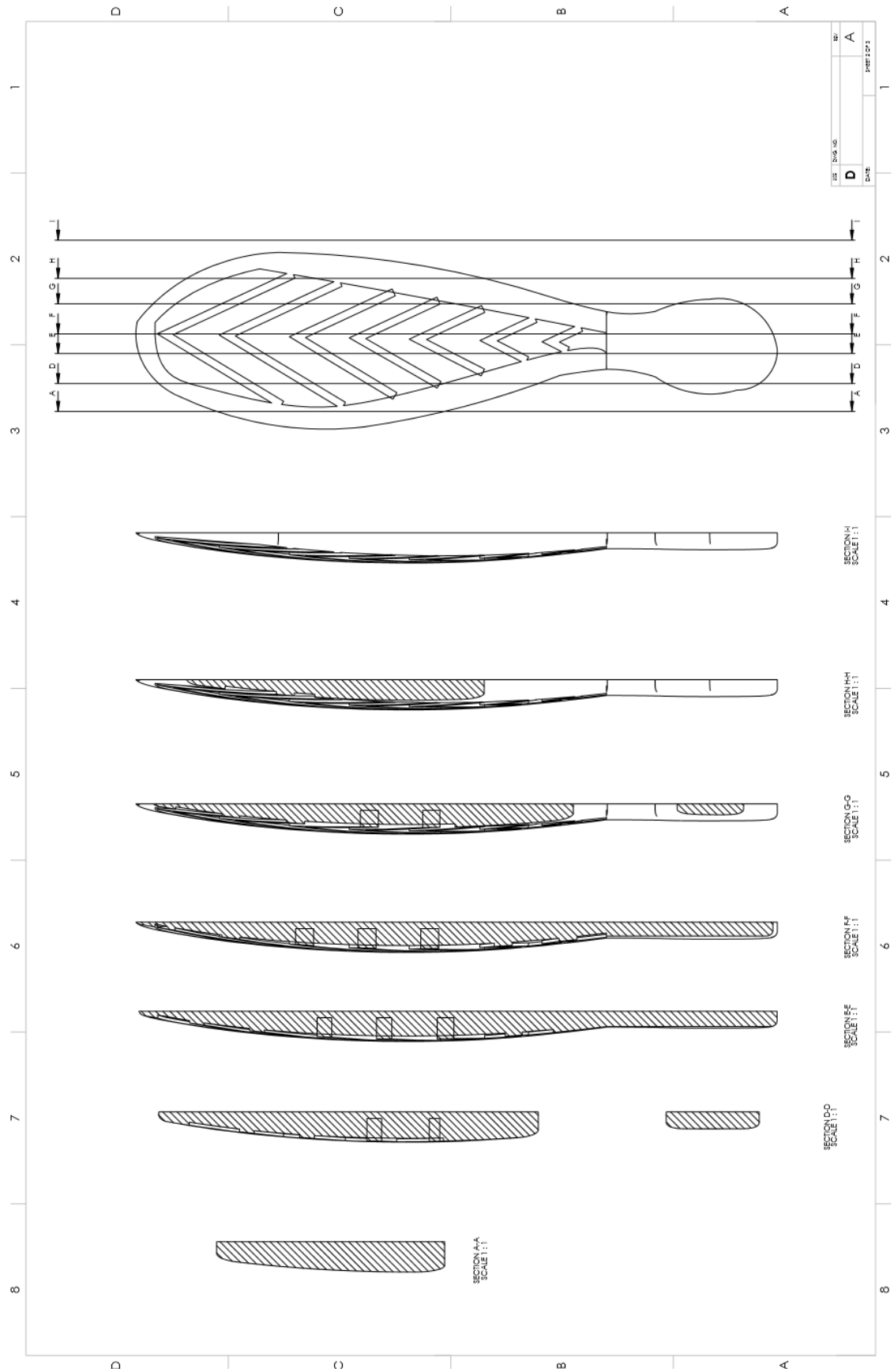
[4] Mitutoyo Mexico (2005). Mitutoyo información técnica. La evolución del comparador óptico. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.mitutoyo.com.mx/Newsletter/Articulo6.html>

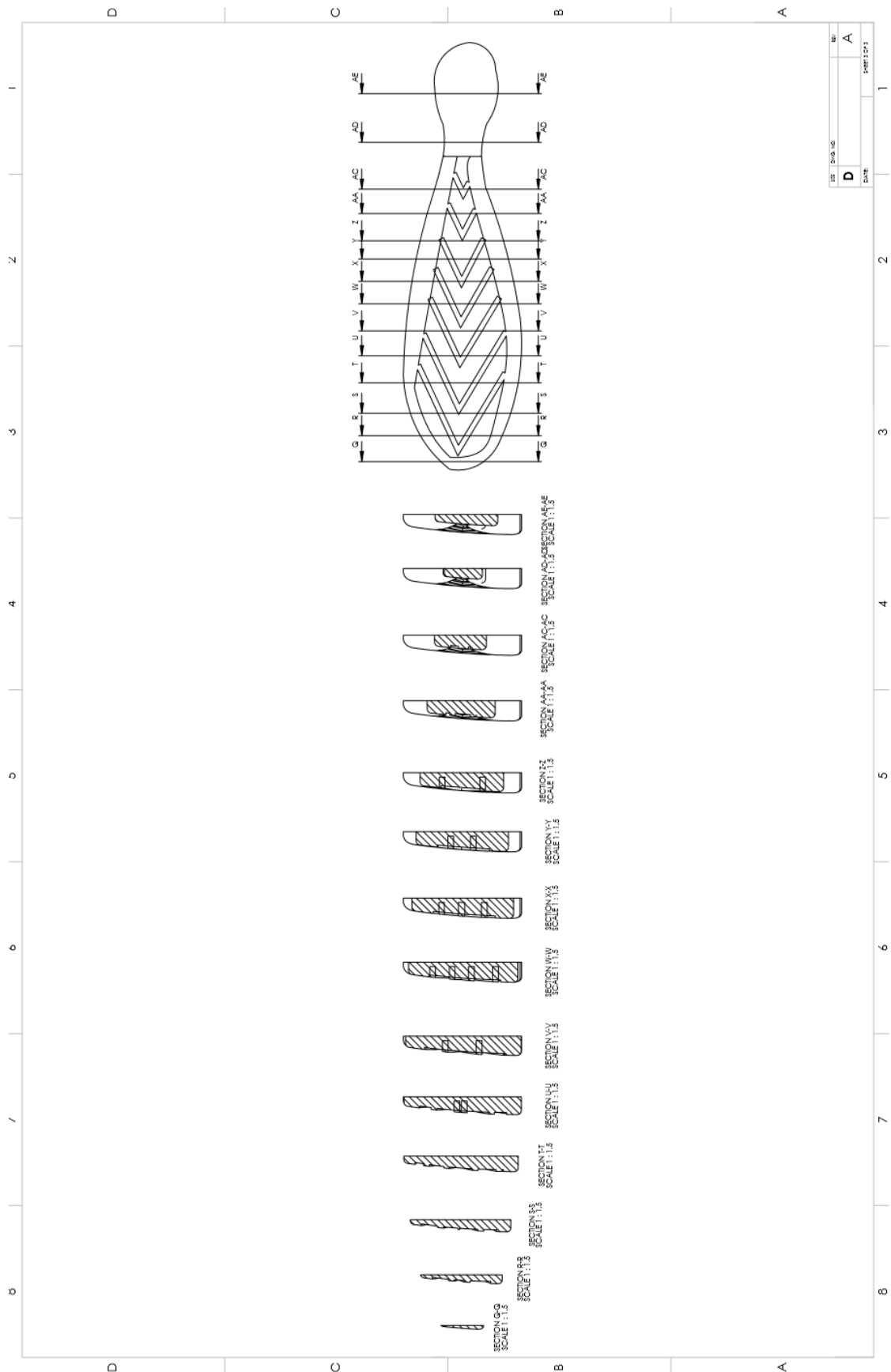
[5] Vision Engineering (2016). Swift Swift-Duo Brochur v2.0 Catalogo. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <http://www.visioneng.com/es/productos/medicion-sin-contacto/swift-duo-sistema-de-medicion-de-optica-y-video>

[6] Mitutoyo (s.f.). Form Measurement. Catalog No.E4333-218 Digital, cost-effective contour measuring instruments feature excellent portability and versatility. Contour Measuring System CONTRACER CV-1000/2000. Consultado el 25 de Enero del 2016. Disponible en: <https://www.mitutoyo.com.tw/oldver/product/pdf/d/E4333-218 CV 1000 2000.pdf>

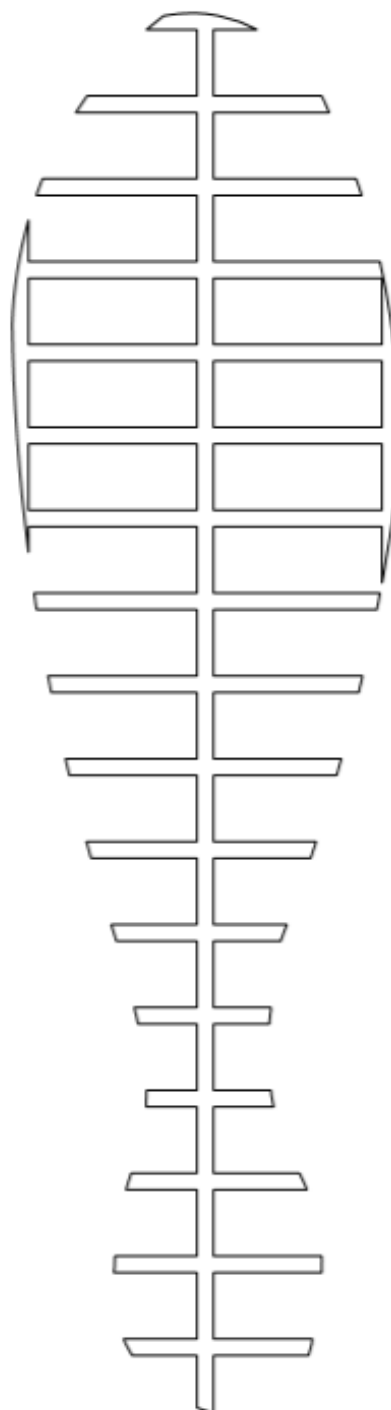
[7] Antequera P., Jiménez L., Miravete A. (1991). Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio, INO Reproducciones, S. A.



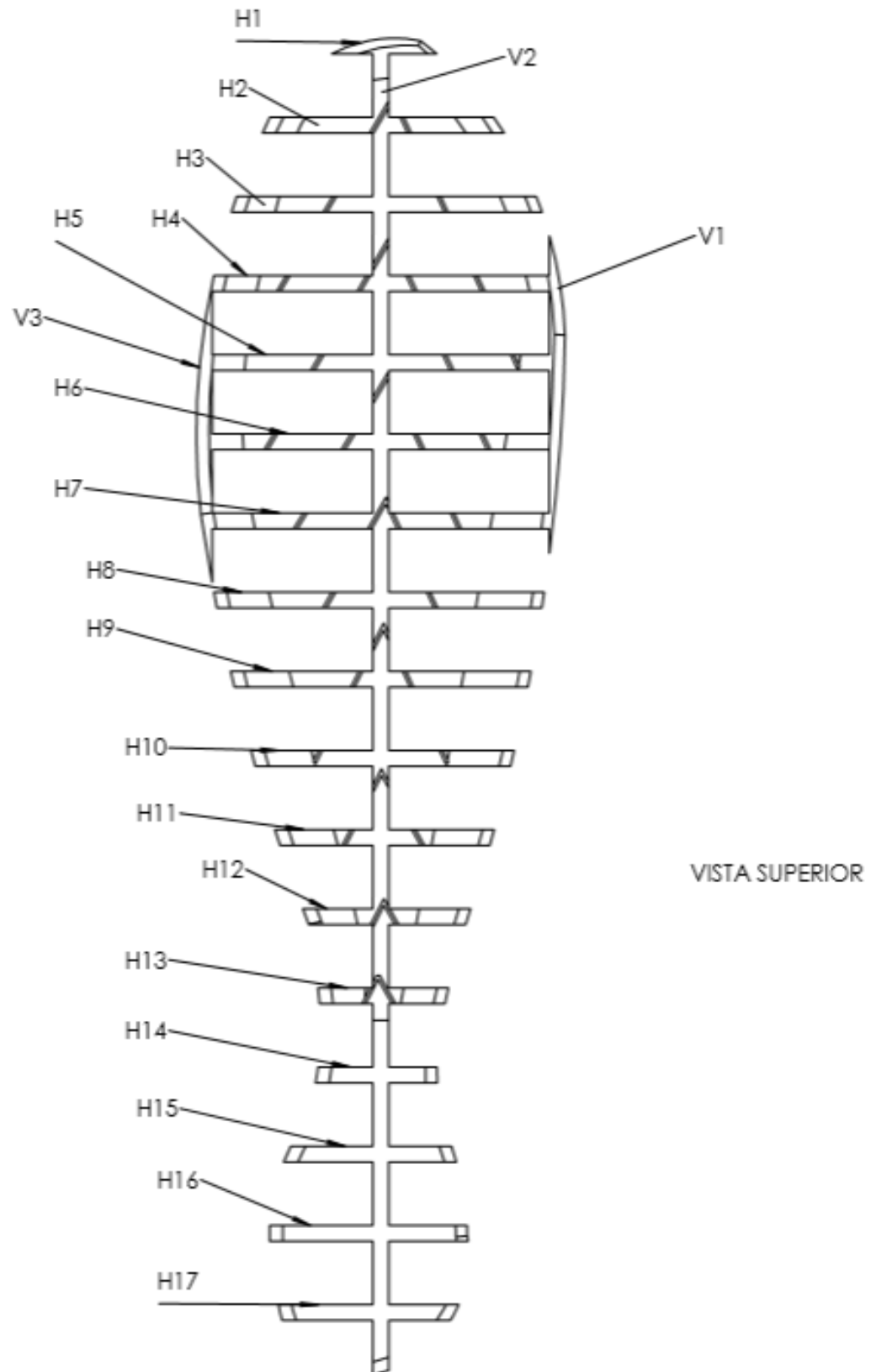


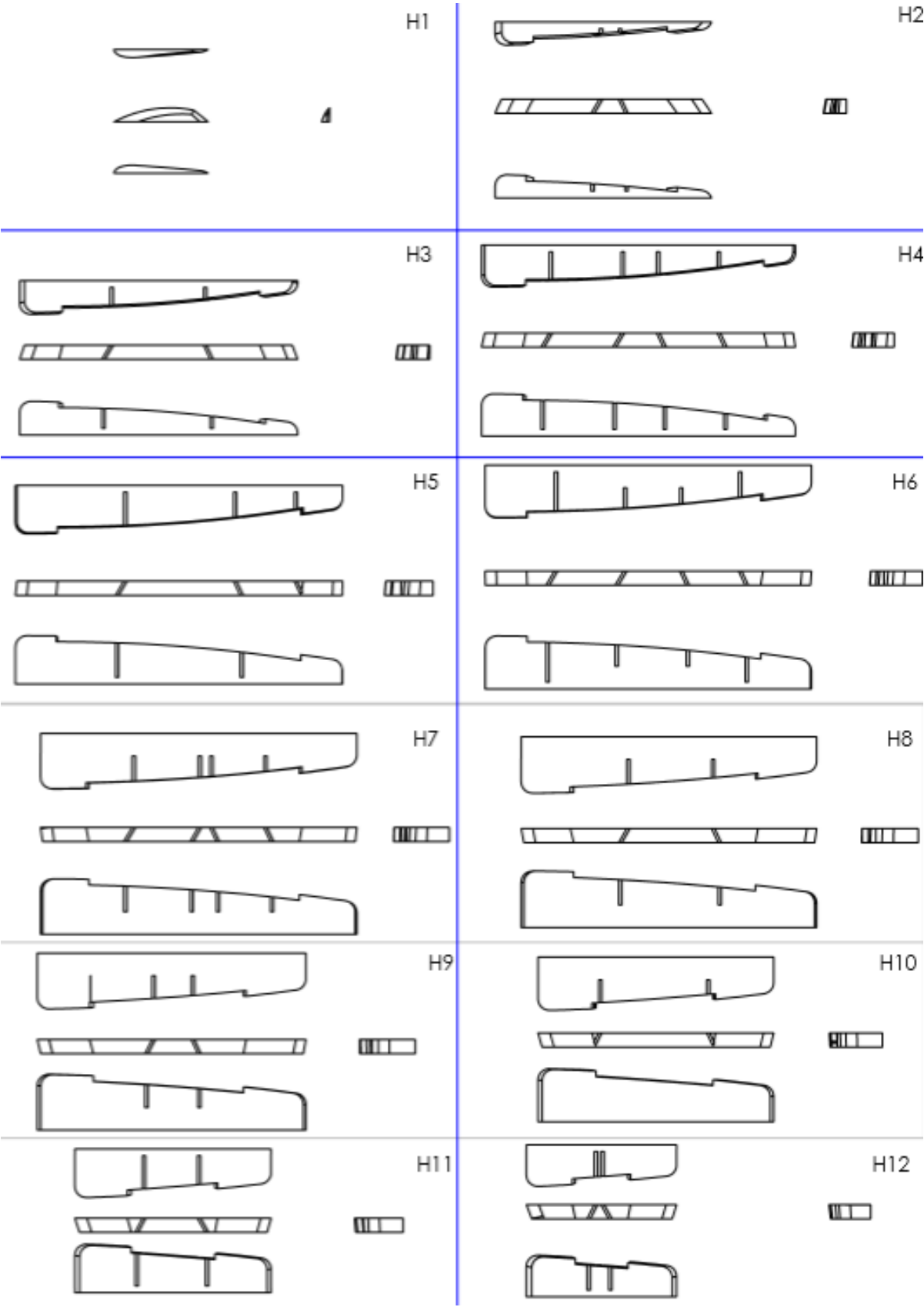


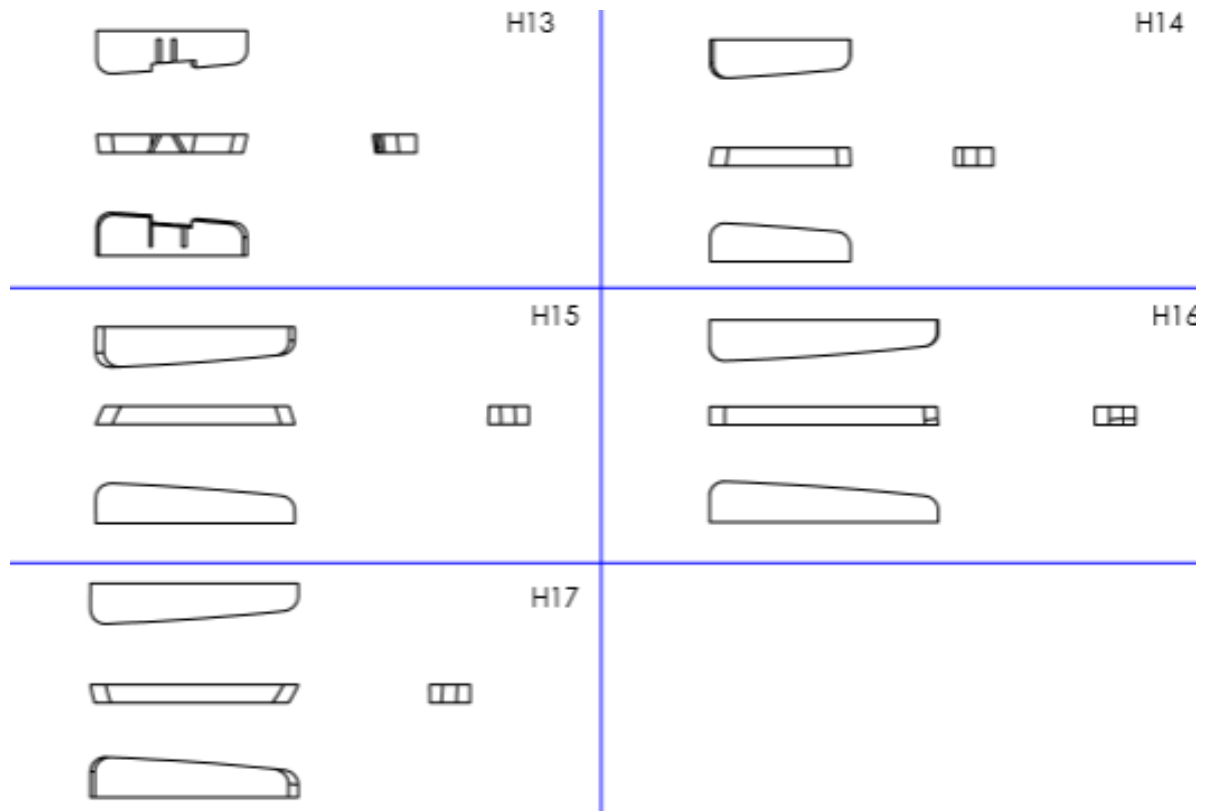
Anexo C Planos para Fabricación por Estereotomía



VISTA INFERIOR







Anexo D Mediciones por Perfilometro

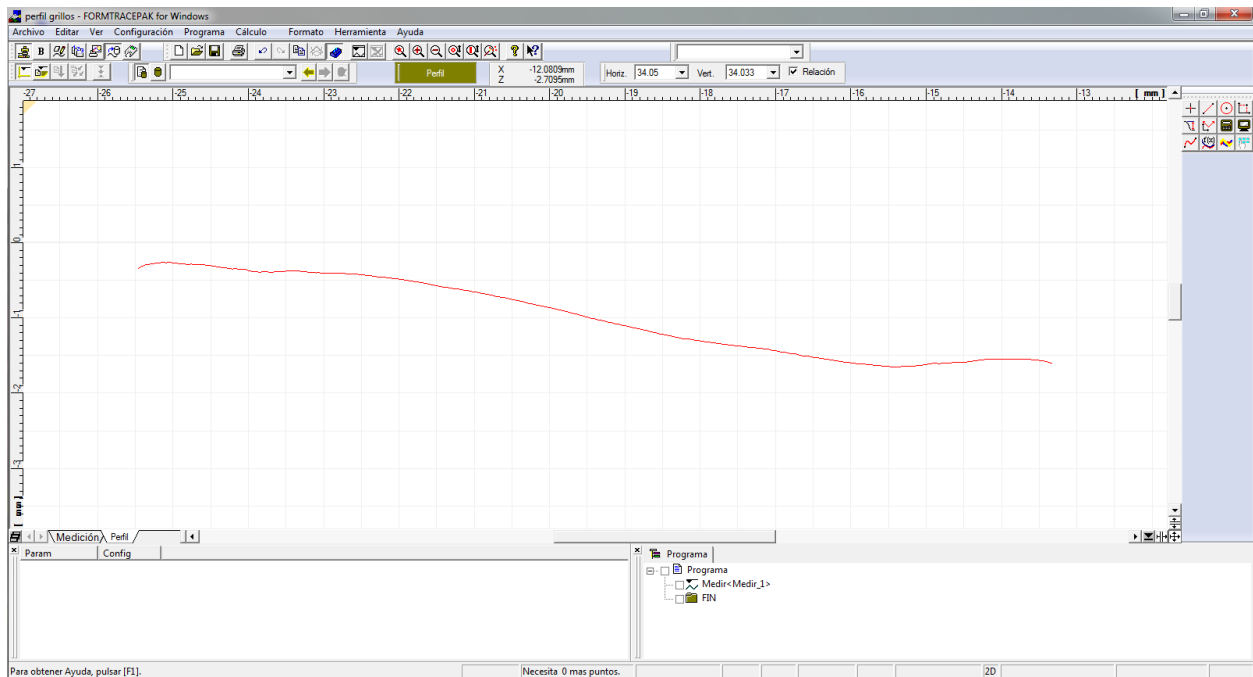


Fig. D -1. Medición de la parte superior del fémur.

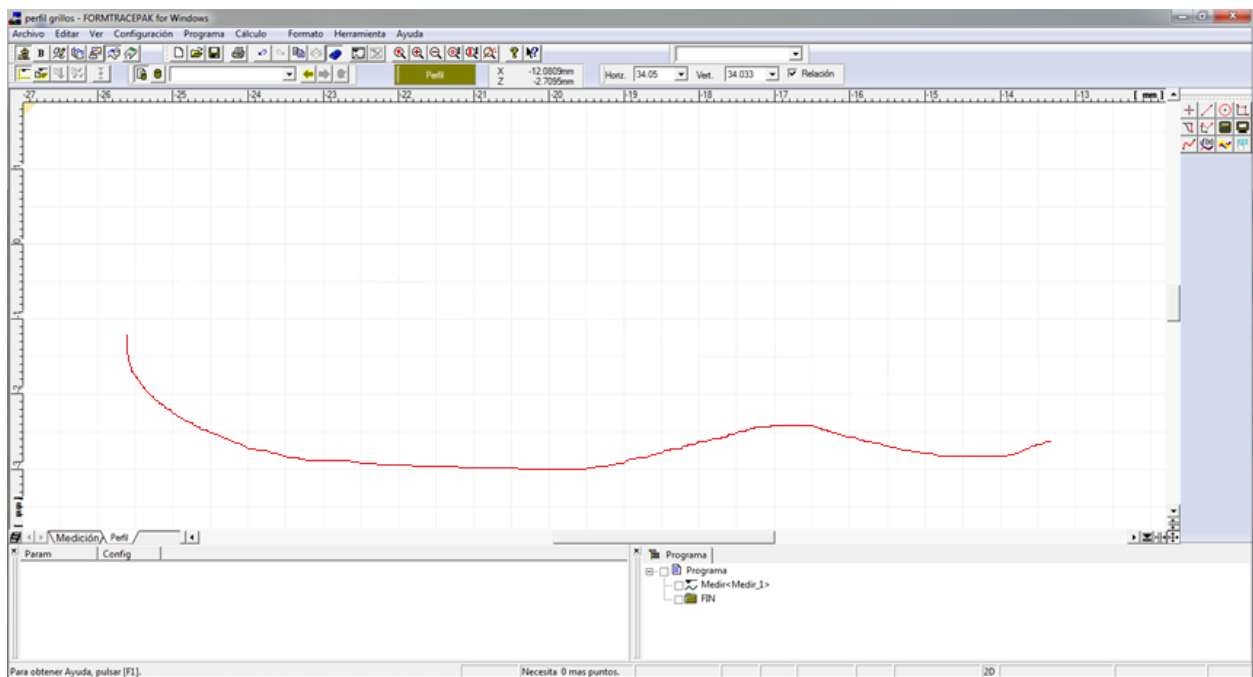


Fig. D -2. Medición de la parte inferior del fémur.

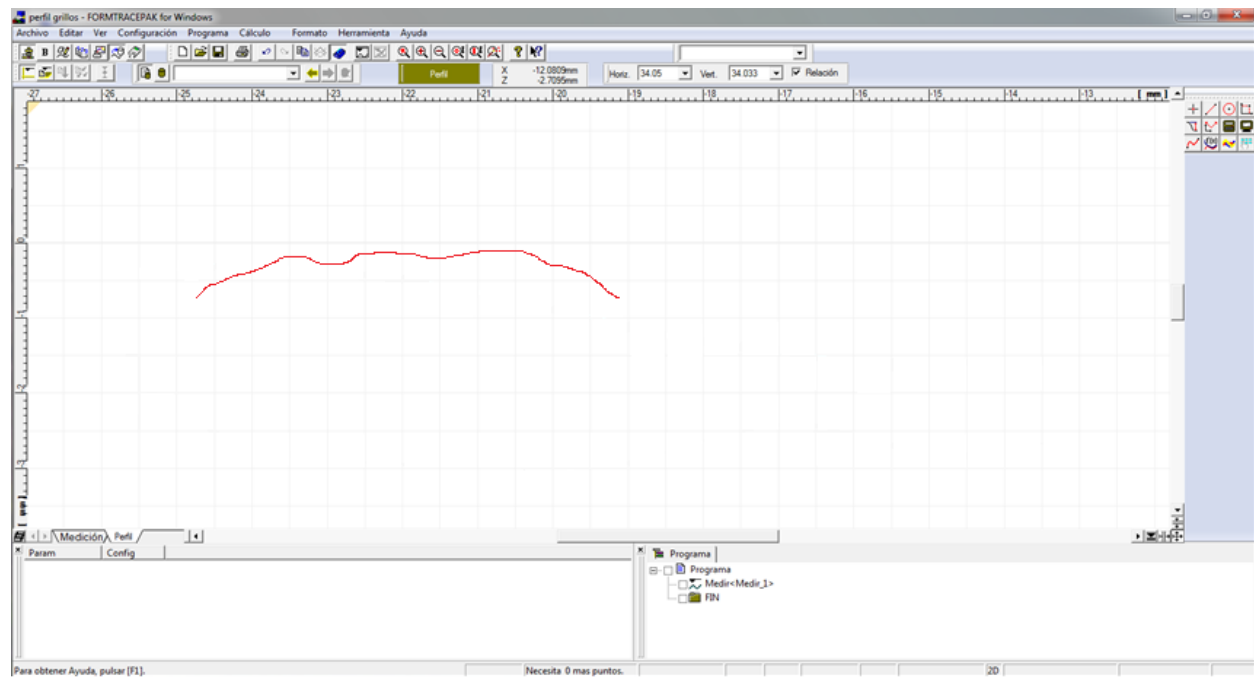


Fig. D -3. Medición del arco superficial del fémur.